

# Trabajo fin de Grado Grado de Ingeniería Aeroespacial

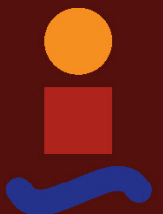
## Diseño de utillaje modular fabricado por FDM para el conformado mediante ISF de elementales aeronáuticas

Autor: Gaspar Flores Lara

Tutor: Andrés Jesús Martínez Donaire

**Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018







Trabajo fin de Grado  
Grado de Ingeniería Aeroespacial

# **Diseño de utillaje modular fabricado por FDM para el conformado mediante ISF de elementales aeronáuticas**

Autor:  
Gaspar Flores Lara

Tutor:  
Andrés Jesús Martínez Donaire  
Profesor Contratado Doctor Interino

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo fin de Grado:     Diseño de utillaje modular fabricado por FDM para el conformado mediante ISF de elementales aeronáuticas

Autor:            Gaspar Flores Lara  
Tutor:            Andrés Jesús Martínez Donaire

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

Me gustaría agradecer a mis padres todo su esfuerzo, pues sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

Agradecer a la profesora Juana M<sup>a</sup> Martínez Heredia sus consejos gracias a los cuales conocí a Andrés Jesús Martínez Donaire, mi tutor durante este proyecto y que ha sido un pilar fundamental durante el desarrollo del mismo. Le agradezco a Andrés el haber sabido dar forma a mis ideas, su dedicación, cercanía y todo lo que me ha enseñado durante este tiempo.

Por último, el autor y el tutor de este trabajo desean agradecer a la Cátedra Aeroespacial AIRBUS de la Universidad de Sevilla por confiar en la idea que el profesor Andrés Jesús Martínez Donaire propuso y haber becado este proyecto a través del "Concurso de Propuestas de Trabajo Fin de Grado sobre un Tema Aeroespacial, edición 2017".

*Gaspar Flores Lara  
Sevilla, 2018*



# Resumen

---

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha diseñado en CATIA y fabricado, usando modelado por deposición de fundido, el utillaje necesario para obtener elementales mediante un proceso de conformado incremental mono-punto. Se presentará un concepto de utillaje modular y una metodología de prototipado rápido. Se comentarán los objetivos que se pretenden cubrir con esta idea y se analizará la viabilidad técnica del proyecto.





# Abstract

---

In the present bachelor thesis, the necessary tooling to obtain sheet metals parts via single point incremental forming has been designed in CATIA and manufactured using fused deposition modeling. A modular tooling concept and a rapid tooling methodology will be presented. The objectives to be achieved with this idea will be discussed and also the technical viability of the project will be analysed.



# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<b>1 Contexto y objetivos del proyecto</b>	<b>1</b>
1.1 Conformado incremental de chapa (ISF)	2
1.1.1 Conformado incremental mono-punto (SPIF)	2
1.2 Técnica de modelado por deposición de fundido (FDM)	3
1.3 Antecedentes y estado del arte	4
1.4 Objetivos del proyecto	6
<b>2 Diseño del utillaje modular</b>	<b>7</b>
2.1 Requisitos para el diseño modular	7
2.2 Conceptualización del diseño modular	7
2.2.1 Evolución del concepto	8
2.2.2 Diseño del utillaje modular definitivo	14
2.3 Metodología de prototipado rápido en CATIA	17
2.3.1 Descripción del flujo establecido: Placa de respaldo	17
2.3.2 Descripción del flujo establecido: Prensachapa	20
2.3.3 Vistas y detalles del conjunto obtenido tras aplicar metodología	21
2.3.4 Esquema del flujo	22
<b>3 Análisis numérico en CATIA</b>	<b>23</b>
<b>4 Fabricación por FDM del utillaje modular definitivo</b>	<b>27</b>
4.1 Tipo de impresora y software utilizados para la fabricación por FDM	27
4.2 Impresión del utillaje modular definitivo	28
4.2.1 Configuración de impresión, parámetros y tiempos	29
4.2.2 Ejemplo del proceso de impresión de una pieza	33
4.3 Proceso de montaje de los útiles para la fabricación de los distintos elementales	38
4.4 Generación de las trayectorias para el conformado mediante SPIF	46
<b>5 Viabilidad técnica del proyecto</b>	<b>49</b>
5.0.1 Diseño del elemental y utillaje de prueba	49
5.0.2 Impresión del utillaje de prueba	50
5.0.3 Conformado del elemental de prueba	51
<b>6 Conclusiones y desarrollos futuros</b>	<b>55</b>
<i>Índice de Figuras</i>	57
<i>Índice de Tablas</i>	61
<i>Bibliografía</i>	63



# 1 Contexto y objetivos del proyecto

---

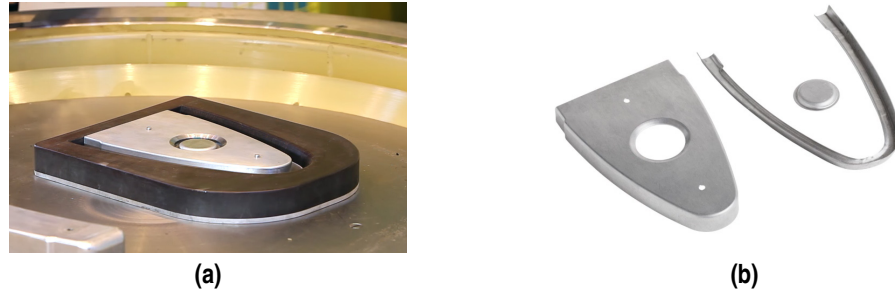
La producción industrial se enfrenta a unas altas exigencias de innovación, flexibilidad y sostenibilidad en sus procesos que le permita mantener una alta calidad en sus productos a precios competitivos. En este ámbito, los procesos de conformado de chapa son procesos de gran importancia industrial en sectores altamente competitivos, e.g. la industria aeronáutica, que requieren la fabricación de productos con alta precisión y cada vez con mayor complejidad geométrica.

El rebordeado convencional de flancos consiste en la generación de una pestaña o brida a lo largo del contorno de una pieza de chapa. Esta es una de las operaciones finales que se realizan a la pieza tras ser conformada para conseguir diferentes funcionalidades como rigidizar el producto, proveer de soporte para el posicionamiento y ensamblado con otras piezas, o simplemente para mejorar el acabado del contorno. Es una operación extensivamente empleada en la industria aeronáutica, e.g. en elementales hidroconformadas como son las costillas de las alas y estabilizadores, clips de cuernas, etc. y en la de automoción, e.g. en paneles de puertas y carrocería. Dependiendo del tipo de borde, durante el proceso de deformación, el material se encuentra sometido a una sollicitación multiaxial de flexión combinada con tracción y/o compresión que da lugar al desarrollo de uno u otro mecanismo de fallo.



**Figura 1.1** Matriz mecanizada para hidroconformar y arrugas presentes en la pieza hidroconformada.

Por ello, en general, se requieren preformas de partida complejas, con muescas estratégicamente distribuidas a lo largo del contorno para controlar el flujo de material, las cuales tienen que ser previamente mecanizadas sin aportar valor añadido a la pieza. Además, la etapa de puesta a punto del hidroconformado requiere una alta inversión en utillaje y matrices dedicadas para cada tipología de elemental, lo cual encarece el proceso en los ciclos de prueba-error durante los nuevos desarrollos. Por ello, el proceso está limitado debido tanto a fuertes restricciones en términos de conformabilidad como en costes por las altas inversiones en utillaje durante la industrialización de nuevos prototipos.



**Figura 1.2** (a) Matriz con prensa chapa; (b) Pieza hidroconformada y material de desecho.

## 1.1 Conformado incremental de chapa (ISF)

En este contexto, el conformado incremental de chapa (ISF - Incremental Sheet Forming) es un proceso capaz de solventar las limitaciones anteriores. ISF, también conocido como conformado por control numérico sin matriz (dieless NC forming), es una tecnología reciente de fabricación flexible, viable para pequeños y medianos volúmenes de producción. A pesar de que se introdujo en 1993 para la realización de prototipos, ha sido a partir de esta última década cuando se está poniendo verdadero esfuerzo investigador en el desarrollo de conocimiento científico y tecnológico encaminado a conseguir su madurez industrial.

Brevemente, el proceso consiste en dar forma al producto deformando en cada instante una pequeña zona de material, normalmente con una herramienta o punzón semiesférico, y haciendo que dicha área de deformación local describa progresivamente el producto completo, programando el recorrido de la herramienta mediante el uso de máquinas de control numérico.

Entre las principales ventajas que avalan el ISF están:

- El bajo coste en comparación con los procesos convencionales;
- La flexibilidad para realizar diferentes geometrías de piezas;
- El incremento de conformabilidad del material;
- Un tamaño de pieza limitado sólo por la capacidad de la máquina-herramienta;
- No son necesarios costosos moldes/matrices o herramientas;
- La geometría de la pieza se reproduce directamente desde un archivo CAD y se puede ejecutar en centros de mecanizado CNC convencionales;
- Las pequeñas fuerzas y potencias necesarias, dado su carácter incremental; y
- Una calidad superficial aceptable.

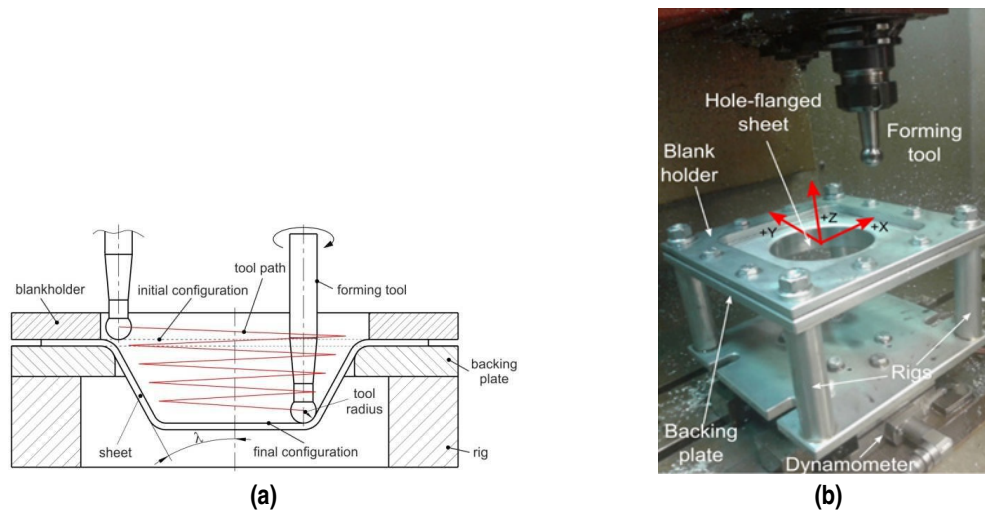
A pesar de que existen muy pocos y muy preliminares estudios sobre el rebordeado de flancos mediante conformado incremental, éstos ponen claramente de manifiesto que el ISF sería capaz de superar ampliamente las limitaciones del proceso convencional en bordes curvos, exhibiendo índices de conformabilidad que pueden superar en hasta dos órdenes de magnitud los valores habituales. Dichos resultados posicionarían industrialmente al proceso de rebordeado incremental de flancos muy por encima respecto al convencional, pudiendo esto ser decisivo especialmente en materiales de escasa ductilidad, como es el caso de las aleaciones de aluminio endurecidas (T3 y T6) empleadas en aeronáutica, muy poco estudiadas en conformado incremental.

En los últimos años el Departamento de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Sevilla, ha llevado a cabo diversas pruebas experimentales sobre las capacidades tecnológicas de este tipo de procesos incrementales, investigando la técnica de SPIF dada sus grandes ventajas aplicada a distintos procesos como el rebordeado de flancos o la realización de rebordeado de agujeros Martínez-Donaire et al., 2017, Morales-Palma et al., 2017, Centeno et al., 2014, Borrego et al., 2016 y Centeno et al., 2017.

### 1.1.1 Conformado incremental mono-punto (SPIF)

La variante más simple de ISF es el conformado incremental mono-punto (SPIF – Single Point Incremental Forming), en el que una vez sujeta la chapa en su periferia y apoyada sobre una placa de respaldo en su parte

inferior (backing plate), una herramienta semiesférica la deforma progresivamente describiendo el contorno de la pieza deseada.



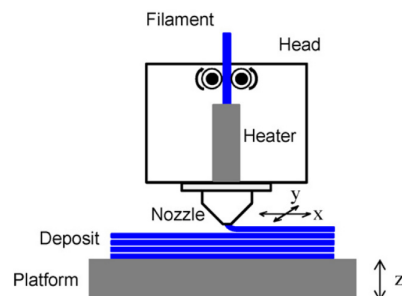
**Figura 1.3** (a) Representación de un proceso SPIF; (b) Montaje para el conformado por SPIF.

La denominación “mono-punto” hace referencia a que la chapa está exclusivamente en contacto con la herramienta durante la deformación y su backing plate de respaldo, no usándose matriz en la cara opuesta de la chapa. De esta forma el SPIF requiere un número mínimo de herramientas/matrices y proporciona una gran flexibilidad. A pesar de ello, siguen siendo necesarias el uso de placas de respaldo (backing plates), aunque a éstas no se les exigen tolerancias estrechas al ser su única función colaborar en el proceso de deformación actuando como un punto de apoyo. Además, los requisitos de resistencia en dichos elementos tampoco son una limitación dado que las fuerzas involucradas en ISF son muy pequeñas dado el carácter local de la deformación.

## 1.2 Técnica de modelado por deposición de fundido (FDM)

En este proyecto se usará la técnica aditiva de modelado por deposición de fundido (FDM - Fused Deposition Modelling) para fabricar el utillaje modular. Esta tecnología fue desarrollada en los 80 por Scott Crump, fundador de Stratasys y comercializada en 1991.

El material termoplástico se encuentra en estado sólido y en forma de filamentos, almacenados en rollos. El extrusor se alimenta con el filamento, a medida que el filamento pasa a través del extrusor éste se funde para que a su salida pueda ser depositado capa a capa formadas por finos hilos del material fundido.



**Figura 1.4** Representación esquemática del FDM (Ahn et al., 2009).

Entre sus ventajas se pueden citar las siguientes:

- Es una tecnología limpia que no genera residuos importantes;

- Fácil de usar;
- Accesible a personas sin amplios conocimientos sobre la misma;
- Permite crear piezas con un alto grado de complejidad;
- No requiere grandes instalaciones para su emplazamiento; y
- Sus costes recurrentes son bajos en comparación con otras tecnologías de fabricación.

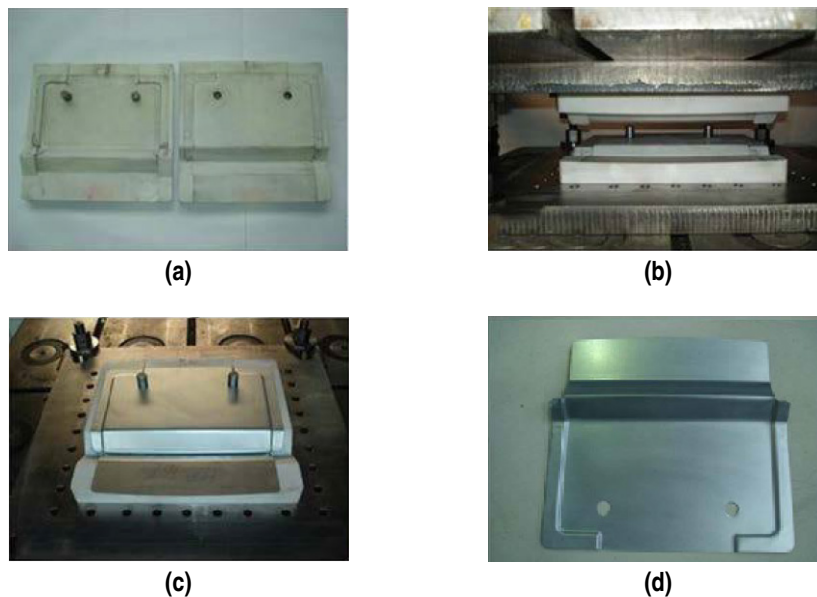
### 1.3 Antecedentes y estado del arte

Actualmente en la industria en la industria aeronáutica comienza a ser tendencia el empleo de las técnicas de fabricación aditiva para el desarrollo de utillaje de montaje. En este sentido AIRBUS y el resto de empresas situadas en el tejido industrial andaluz están comenzando a introducir la tecnología de impresión 3D para la fabricación de diferentes de plantillas de taladrado previo, fabricadas en polímero plástico con refuerzos "honeycomb" interno, para aligeramiento de peso Labuz, 2017.



**Figura 1.5** Plantilla de polímero para taladrado previo (Labuz, 2017).

Como se comentaba al inicio del capítulo, la industria se ve presionada constantemente a reducir el tiempo y coste de desarrollo de los productos sin que estos pierdan calidad, para ello el desarrollo de nuevas tecnologías de prototipado rápido es fundamental. En Durgun, 2015 Durgun hace un estudio sobre el prototipado rápido de herramientas para el conformado de chapa de pequeños lotes de producción usando FDM. En este estudio el autor aplica una metodología de moldeo por deposición fundida para fabricar matrices de policarbonato que serán usadas en un proceso de estampación de chapa de acero.



**Figura 1.6** (a) Matrices de policarbonato superior e inferior; (b) Montaje en prensa hidráulica; (c) Matriz inferior; (d) Pieza estampada (Durgun, 2015).



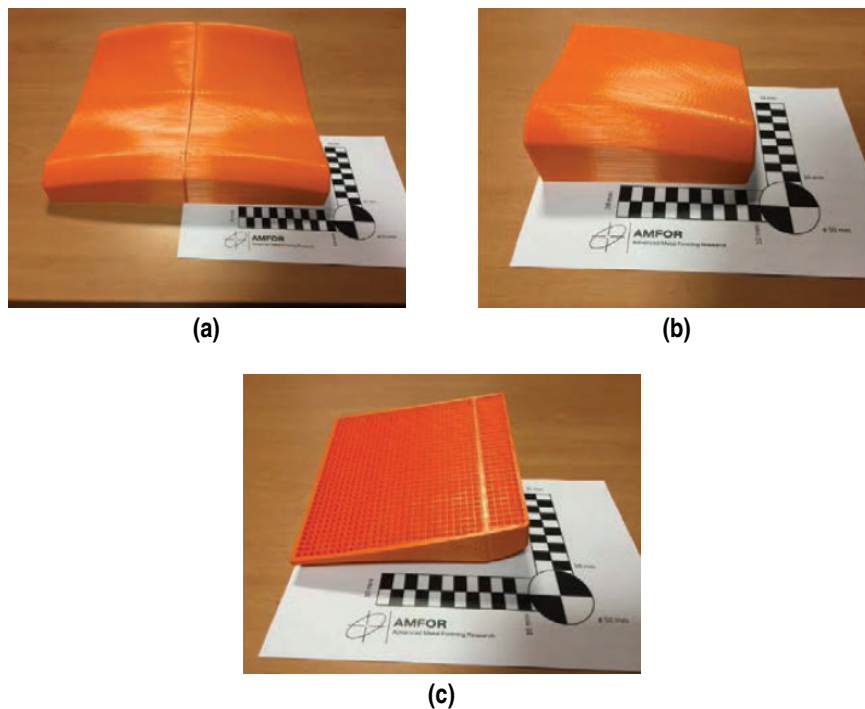
Con este estudio el autor Durgun, 2015 pone de manifiesto que es factible el conformado de chapas metálicas para pequeños lotes de producción mediante matrices fabricadas por FDM, con una significativa disminución de costes y ahorro de tiempo.

Otra aportación a la aplicación del FDM para bajos volúmenes de producción se da en Leacock et al., 2017. Estos autores proponen el uso de la fabricación aditiva para imprimir pequeñas secciones de piezas que serán ensambladas para obtener útiles de gran tamaño, los cuales serán usados para procesos de estirado de chapa. En este estudio conforman una pieza de aluminio 5083-O y espesor de 3mm con doble curvatura.



**Figura 1.7** (a) Superficie superior de la pieza conformada; (b) Superficie de la pieza en contacto con el útil (Leacock et al., 2017).

El útil fue impreso haciendo uso de una impresora de bajo coste Ultimaker 2 3D. Debido a las limitaciones del volumen de impresión el útil fue impreso en cuatro partes que serían ensambladas posteriormente. La herramienta fue impresa en PLA con 0,2mm de resolución, un grosor de pared de 5mm y un relleno con patrón lineal del 15%.



**Figura 1.8** (a) Piezas ensambladas; (b) Superficie superior de la pieza; (c) Superficie inferior de la pieza (Leacock et al., 2017).

Una de las conclusiones a las que llegó el equipo fue el considerable ahorro de entorno al 70 % que consiguieron usando el FDM frente a los procesos tradicionales de mecanizado para obtener el mismo útil.

## **1.4 Objetivos del proyecto**

El objetivo principal de este proyecto consiste en el diseño de un sistema de utillaje modular que permitiría la fabricación flexible de diferentes elementales aeronáuticas de chapa o de material polimérico mediante un proceso de conformado incremental monopunto. El diseño para la fabricación de dicho utillaje se realizaría considerando la técnica aditiva de modelado por deposición de fundido (FDM - Fused Deposition Modelling) usando materiales plásticos, la cual permitirá reducir aún más los tiempos y costes de fabricación del utillaje auxiliar y por tanto del producto final, para una variedad de elementales aeronáuticas.

El diseño del sistema estará dotado de una parte fija y otra parte modular desmontable particularizada para cada tipo de elemental.

Así, la presente propuesta muestra una notable novedad y relevancia tecnológico-industrial, siendo uno de los primeros trabajos en la aplicación de esta tecnología emergente de ISF aplicada a elementales aeronáuticas y combinada con la flexibilidad de las técnicas aditivas de fabricación para reducir los costes y el tiempo de puesta en mercado de un determinado prototipo.

## 2 Diseño del utillaje modular

---

Este capítulo supondrá el core sobre lo que versa este TFG. Si bien el fin último del mismo es la fabricación de elementales aeronáuticos, la idea de innovación de *modularidad* que aquí se propone tiene su esencia en su aplicación al diseño de las herramientas que nos permitan la fabricación de tales elementales.

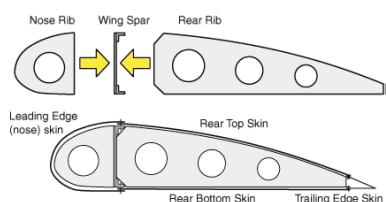
### 2.1 Requisitos para el diseño modular

Con el fin de alcanzar los objetivos establecidos, el diseño debía cumplir unos requisitos. Para hacerlo accesible debía estar desarrollado con un software de uso común en la industria como es CATIA. El diseño debía *estandarizarse* lo máximo posible, al estandarizar las distintas partes que lo componen; se favorece la rapidez durante el proceso de diseño entre distintas piezas, se asegura el ensamblaje entre partes y se facilita el poder hacer un diseño mucho más modular. Las distintas partes que conforman el diseño modular debían poder ser *intercambiables*, para que exista una reciprocidad de cambio de elementos entre sí, sin necesidad de realizar operaciones o retoques sobre elementos o *reemplazables* con una mínima realización de operaciones de ajuste entre elementos.

### 2.2 Conceptualización del diseño modular

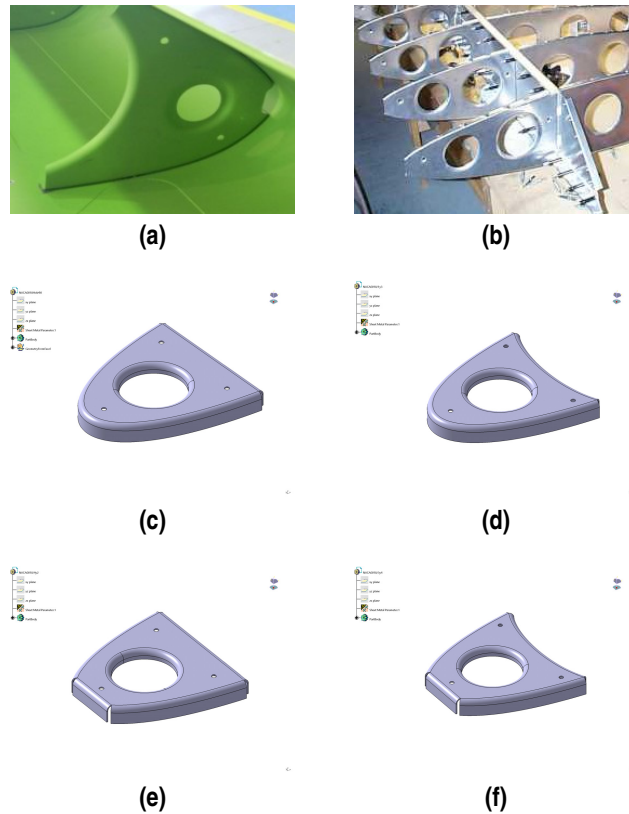
En esta sección se va a plasmar la evolución que ha ido tomando el diseño de los distintos utillajes necesarios y se podrá ver como a medida que éste avanza, la idea de *modularidad* va tomando forma con una mayor presencia en el propio diseño a lo largo de su progresión.

El elemental que se pretende fabricar es una "nose rib", es decir la parte del borde de ataque de la costilla de un ala.



**Figura 2.1** Perfil esquemático de una estructura alar .

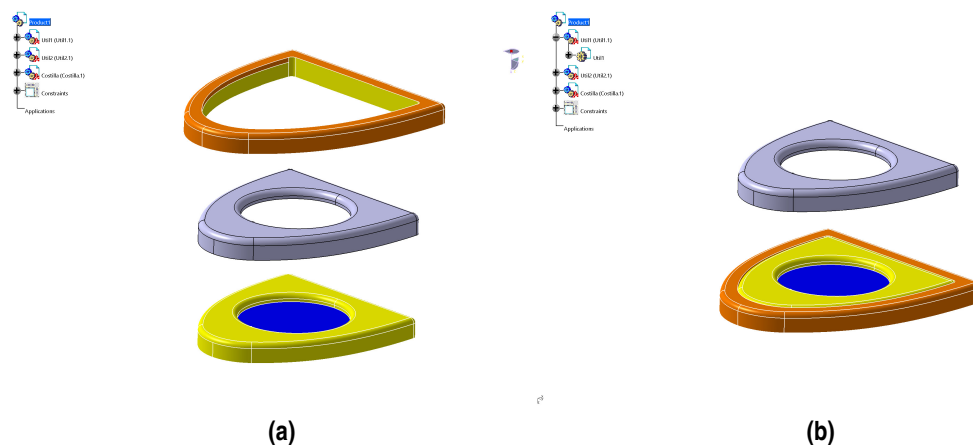
En base a esto se hizo una búsqueda para recopilar información y poder simular en CATIA, usando el módulo de *Generative Sheetmetal Design*, costillas que presentaran aspectos típicos de los usados en la industria aeronáutica. Se partió de un perfil *NACA 0018* y sobre éste se realizaron distintas modificaciones obteniéndose así varias costillas.



**Figura 2.2** (a) y (b) ejemplos reales de "nose rib"; (c)(d)(e)(f) costillas realizadas en CATIA.

### 2.2.1 Evolución del concepto

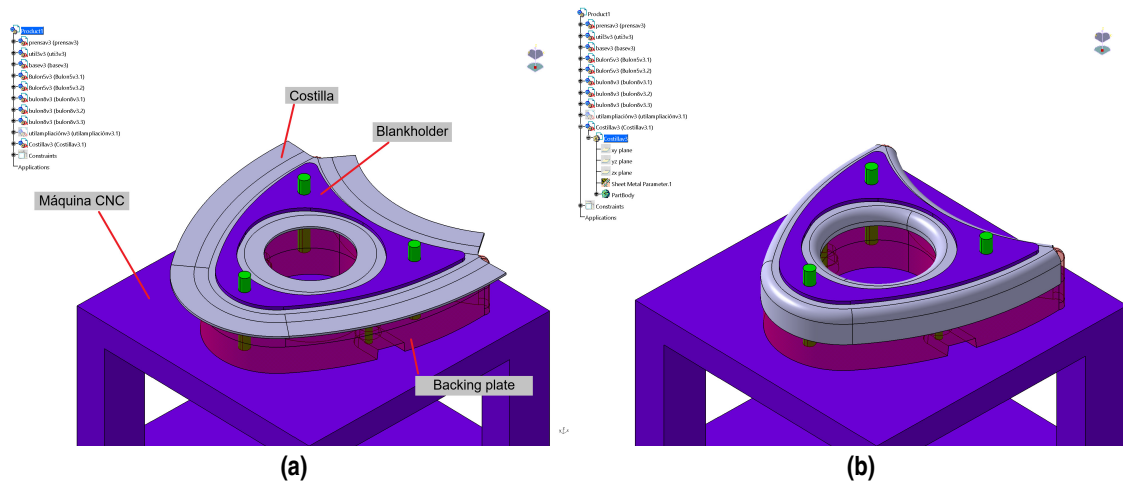
Para poder visualizar la idea y sobre ésta discutir las futuras modificaciones se realizó una primera versión de lo que sería el futuro utillaje modular tomando una costilla del tipo *Figura 2.2 (c)* como elemental.



**Figura 2.3** Versión 1 utillaje modular: (a) Vista expandida del conjunto; (b) Ensamblaje para ampliar la placa de respaldo (backing plate) original.

En esta primera versión se planteaba la fabricación de una placa de respaldo (pieza amarilla) para conformar una costilla y presentaba la posibilidad de fabricar la misma costilla con un perfil ampliado utilizando para ello otra pieza impresa (pieza naranja) que ensamblaría con el backing plate tal y como se puede observar en la *Figura 2.3 (b)*.

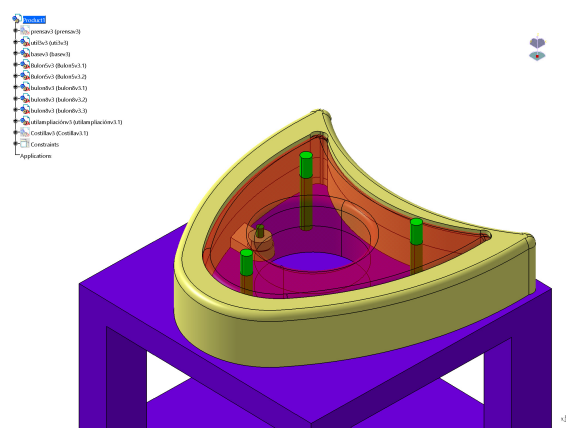
En la siguiente revisión se decidió avanzar con el concepto que se había desarrollado en la *Versión 1* sobre usar un útil que de alguna forma amplie la placa de respaldo original para poder fabricar costillas de mayor tamaño. Además se pensó que era aconsejable empezar a visualizar cómo sería el montaje de todo el conjunto en la máquina de CNC, ya que sería necesario diseñar un sistema para fijar las distintas herramientas, tanto entre ellas mismas como a la propia máquina de CNC. Además se decidió tomar como base la costilla del tipo *Figura 2.2 (d)* ya que este diseño permite añadir de forma más fácil un útil para crear una costilla del tipo *Figura 2.2 (c)* que si fuera al contrario.



**Figura 2.4** Versión 2 utillaje modular: (a) Conjunto ensamblado con costilla sin conformar; (b) Conjunto ensamblado con costilla conformada.

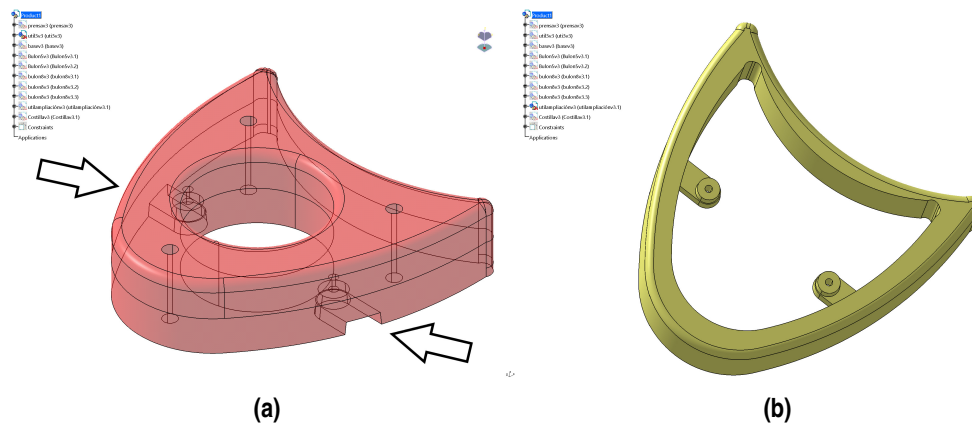
Como se puede observar en la *Figura 2.4 (a)* con esta versión se empezó a introducir también el diseño del prensachapa (blankholder) que utilizaríamos durante el proceso de conformado, en esta versión temprana el prensa chapa, a diferencia del resto de herramientas, sería metálico. También se puede observar cómo el diseño se aprovecharía de los *taladros de utillajes* que presenta la costilla para hacer pasar por ellos los tornillos (piezas verdes) que nos ayudarían a fijar el conjunto entre sí y a su vez a la máquina de CNC.

En la *Figura 2.5* se puede ver como quedaría el conjunto ensamblado con el útil de ampliación. También se pueden observar con más detalle los tornillos pasantes.



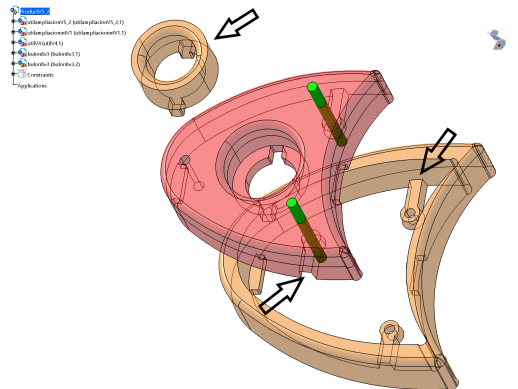
**Figura 2.5** Versión 2 utillaje modular: Conjunto ensamblado con útil de ampliación.

En esta versión el método de ensamblaje entre la placa de respaldo y el útil de ampliación, como se puede observar en la *Figura 2.6 (a)* y señalado con flechas, consistía en un par de acanaladuras realizadas a la placa de respaldo para que esta pudiera encajar sobre el útil de ampliación. A si mismo, se habían realizado unos orificios para poder hacer pasar unos bulones con el fin de centrar la fijación.



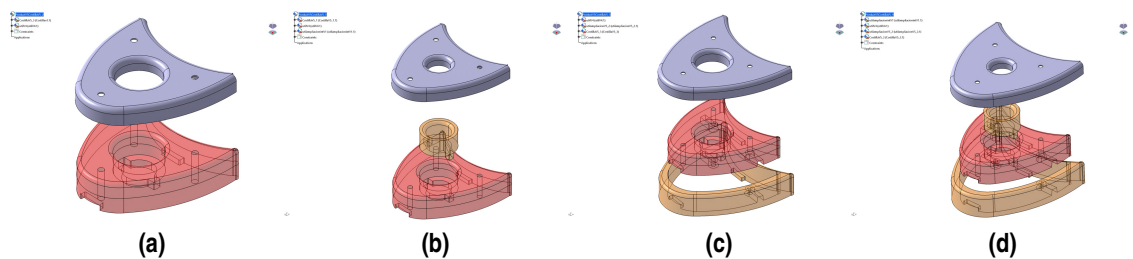
**Figura 2.6** Versión 2 utillaje modular: (a) Placa de respaldo; (b) Útil de ampliación para la placa de respaldo.

Con la revisión de la segunda versión se contempló modificar las acanaladuras, como puede verse en la *Figura 2.7*, para que los orificios de éstas coincidieran con los dos orificios pasantes que ya tenía el backing plate y de esta forma aprovechar ambos orificios para referenciar ambas piezas y facilitar sus futuros diseños o modificaciones. Además se introduce un nuevo útil, para permitir variar el radio del hole-flanging.



**Figura 2.7** Versión 2.1 utillaje modular: Conjunto ensamblado con útil de ampliación.

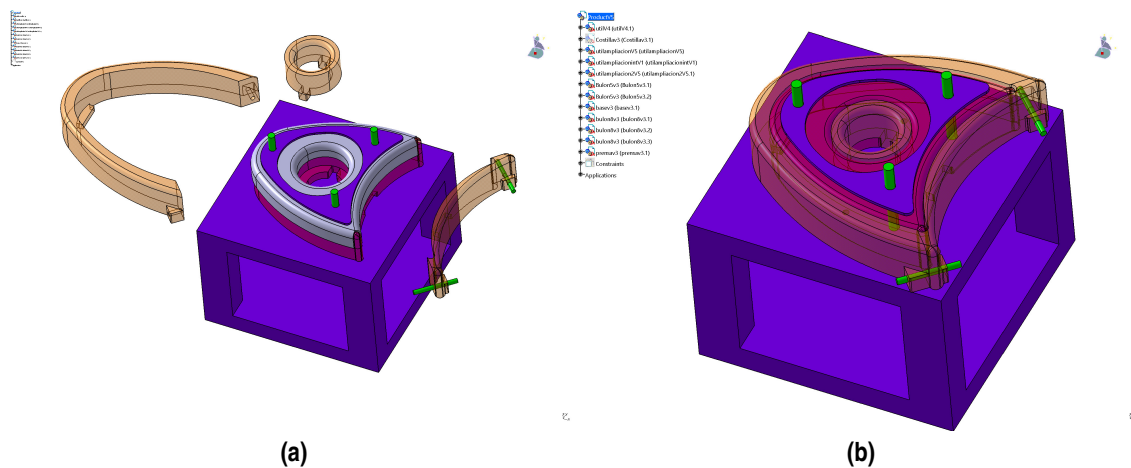
Con esta versión se hace visible como gracias a la modularidad que va tomando forma en el diseño, se pueden fabricar distintos tipos de costillas con un pequeño número de útiles distintos ensamblando las distintas configuraciones posibles. *Figura 2.8*



**Figura 2.8** Versión 2.1 utillaje modular: Costillas obtenidas según las distintas configuraciones.

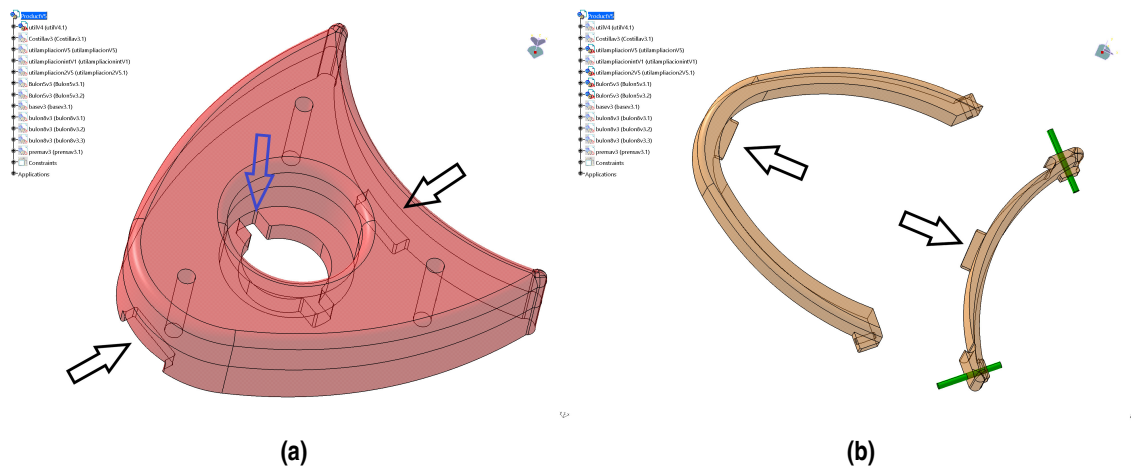
Bien es cierto que esta versión no terminaba de convencer por como se fijaban las piezas entre si y a la máquina de CNC. Ya que una vez fijada la placa de respaldo a la máquina, si se quisiera ensamblar con el útil de ampliación, se tendría que desmontar todo perdiendo de esta forma todo el conjunto la referencia con la máquina de CNC.

Con la *Versión 3* aparece el concepto de mantener siempre uno de los útiles impresos fijos a la máquina de CNC y de esta forma no perder las referencias. A dicho útil fijo se le ensamblarán los útiles de ampliación. Para solventar esto, se rediseñó el útil de ampliación de la *Versión 2* (pieza naranja), se dividió en dos para que se ensamblara a la placa de respaldo fija a modo de abrazadera.



**Figura 2.9** Versión 3 utillaje modular:(a) Vista expandida del conjunto; (b) Ensamblaje del útil de ampliación.

En la *Figura 2.9* se puede ver como sería el nuevo modo de ensamble para fabricar una costilla de mayor tamaño. El útil de ampliación dispone unos tornillos para poder hacer el apriete lateral sobre el backing plate (placa de respaldo) a modo de abrazadera.

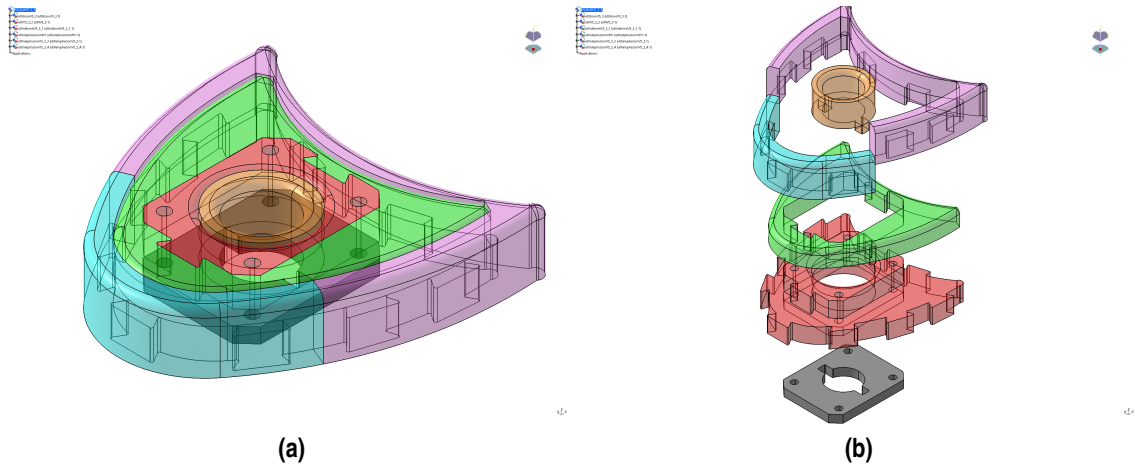


**Figura 2.10** Versión 3 utillaje modular:(a) Placa de respaldo; (b) Útil de ampliación para la placa de respaldo.

Con el fin de mejorar el ensamble e impedir desplazamientos o giros se realizaron unas pestañas y acanaladuras *Figura 2.10 (a) y (b)* (flechas negras) en ambas herramientas. A sí mismo también se le dotó de unas pestañas al útil para ampliar el hole-flanging y una acanaladura en el backing plate *Figura 2.10 (a)* (flecha azul) que serviría de apoyo al útil de ampliación cuando se encaje y evitaría un posible giro del mismo durante el proceso de conformado de la chapa.



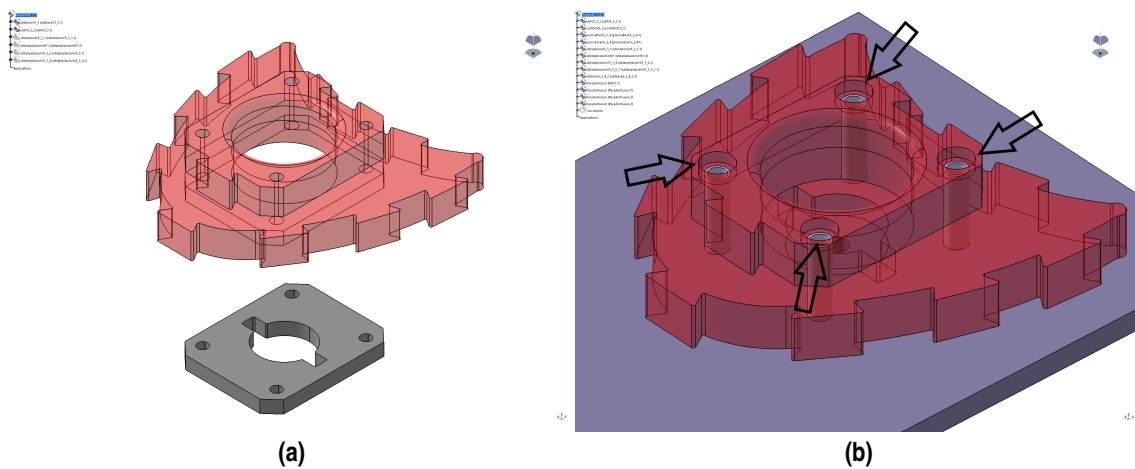
Con las ideas expuestas en las distintas versiones se decidió aunarlas con el fin de tomar lo mejor de cada versión. En la *Versión 4* se retoma la idea de poder realizar el ensamble vertical en lugar de lateral, ya que así las piezas quedan mejor consolidadas en el conjunto y resulta más fácil su alineación final.



**Figura 2.11** Versión 4 utillaje modular:(a) Vista de una de las configuraciones del conjunto; (b) Vista expandida ensamble vertical.

En esta versión la placa de respaldo (backing plate) de la *Versión 3* Figura 2.10 (a) se ha dividido en dos útiles (piezas roja y verde Figura 2.11 (b)) de tal forma que se mantiene la idea de tener un backing plate (pieza verde) para conformar una costilla y este backing plate apoyará sobre una base fija (pieza roja). De esta forma se permiten crear distintos diseños de backing plates simplemente reemplazando la pieza verde y manteniendo la roja fija. Se siguen teniendo útiles de ampliación divididos que se ensamblarían para poder fabricar costillas de mayor tamaño.

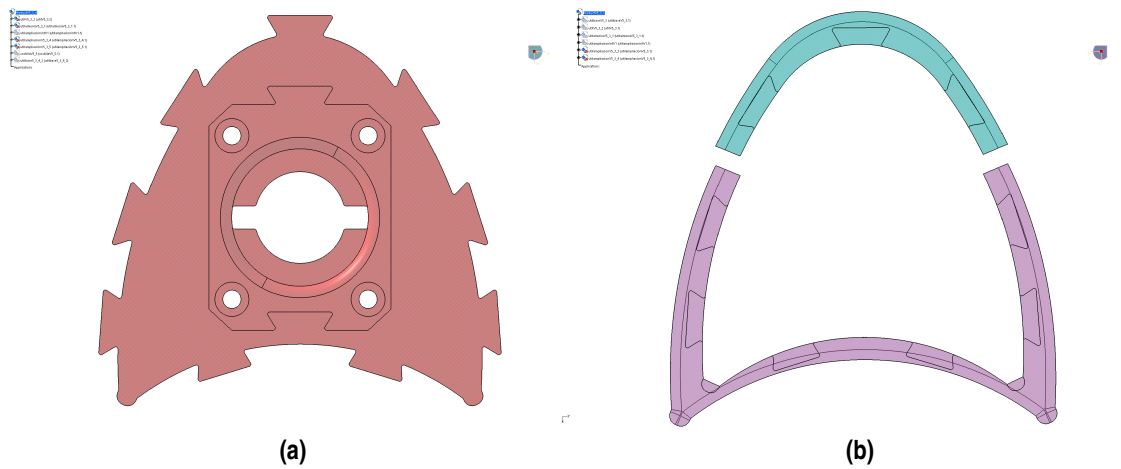
Como se puede observar en la Figura 2.11 (b) y 2.12 (a), con la idea de mantener siempre una parte del conjunto fijo a la máquina de CNC y no perder la referencia, se diseñó una pieza metálica para que quedara atornillada a la máquina de CNC. Sin embargo, se decidió eliminar dicha pieza metálica y que todo el conjunto de la Figura 2.12 (a) fuera impreso en una sola pieza, de esta forma se tiene una base de apoyo (pieza roja) para los distintos backing plates que serán fijados a la máquina CNC mediante cuatro tornillos pasantes Figura 2.12 (b) (flechas negras) y al estar fijada siempre a la máquina de CNC no se perdería la referencia. Estos taladros tendrán un avellanado con el fin de que las cabezas de los tornillos queden embutidas en el útil y la chapa pueda apoyar sin problemas.



**Figura 2.12** Versión 4 utillaje modular:(a) Concepto de fijación deseado; (b) Base de apoyo fija a la máquina de CNC.

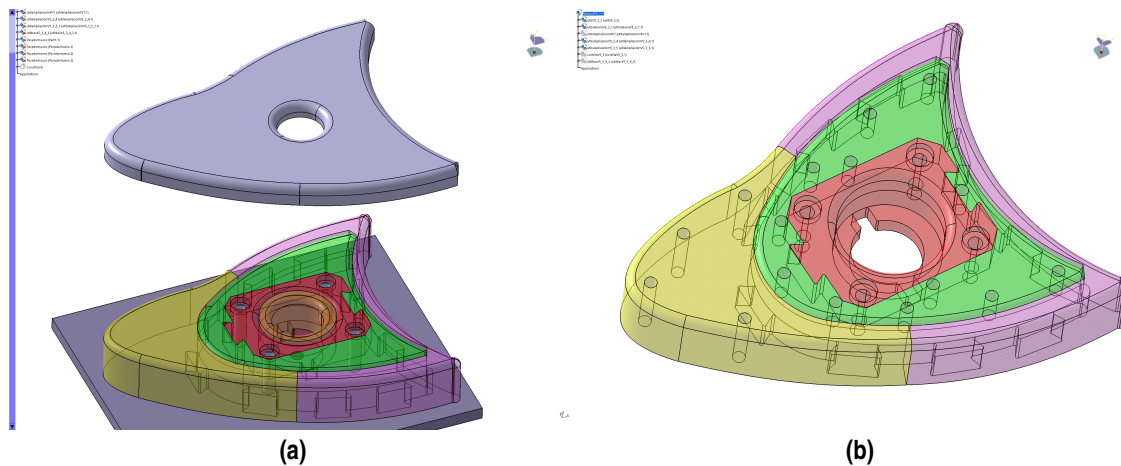


En la *Versión 4* queda definido el concepto de almenas con el que se favorecerá a la modularidad del diseño. En la *Figura 2.13* se puede observar cómo la base fija (pieza roja) presenta almenas en su perfil, mientras que los útiles que se ensamblan a ésta, presentan vaciados para poder encajar en las almenas.



**Figura 2.13** Versión 4 utillaje modular: Visualización de las almenas en los útiles.

Este sistema de almenas y útiles modulares, posibilita una gran variedad de diseños y configuraciones entre ellos, lo que permite fabricar no solo costillas de mayor tamaño, sino costillas con diversas formas como se puede observar en la *Figura 2.14 (a)*.

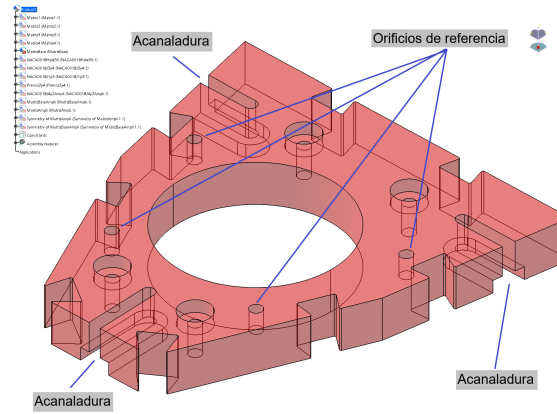


**Figura 2.14** Versión 4 utillaje modular: (a) Ejemplo de costilla obtenida al variar la configuración de útiles; (b) Orificios para fijar el prensachapa.

En la *Figura 2.14 (b)* se muestran los distintos orificios que se realizaron al diseño modular con el fin de permitir fijar los distintos prensachapas que se utilizarían para conformar en cada una de las configuraciones. La idea era que cada configuración utilizara los que pertenecerían a los taladros de utillaje que presentara la costilla a fabricar. Se debe tener en cuenta no realizar demasiados taladros para que las piezas no se vean debilitadas.

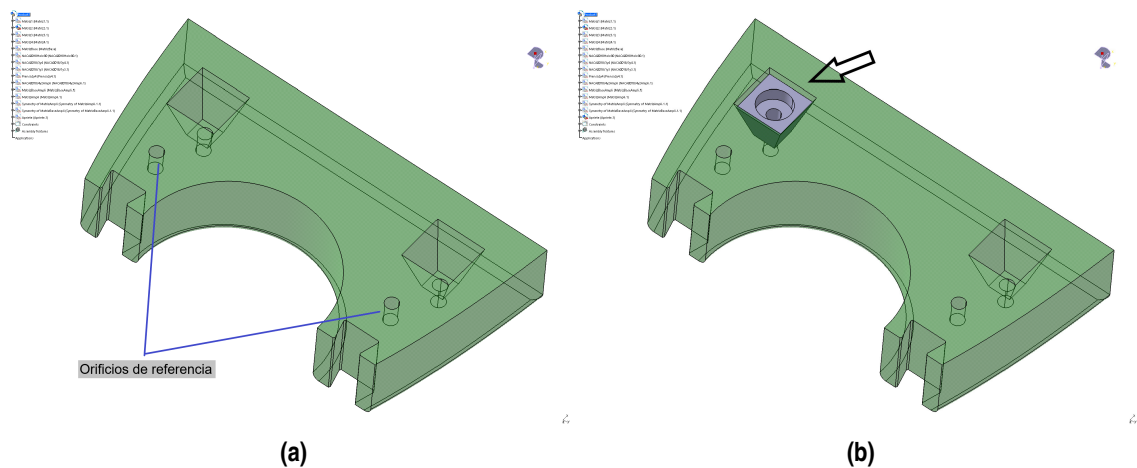
### 2.2.2 Diseño del utillaje modular definitivo

Una vez se hizo una revisión de la *Versión 4* para realizar las últimas modificaciones al diseño y poder cerrarlo, se decidió que la base fija (pieza roja) no formara parte de la placa de respaldo y simplemente actuara de apoyo y sujeción a la máquina de CNC. Con ello se consigue una mayor capacidad de modificación en las placas de respaldo así como una mayor modularidad.



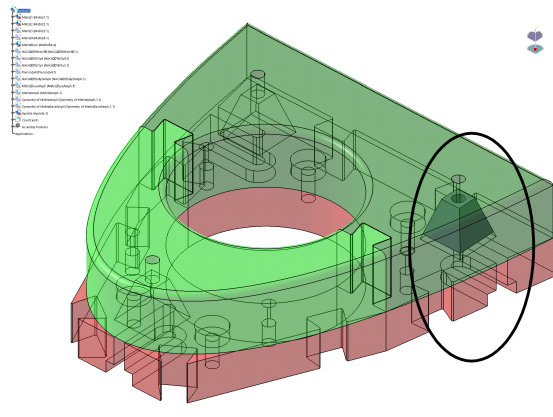
**Figura 2.15** Versión 5 utillaje modular definitivo: Base fija.

La base presenta un diseño almenado, lo que permite que sea ampliable acoplándole extensiones cuando el diseño requiera una ampliación de la misma. Además cuenta con unos orificios con el fin de poder referenciar las distintas matrices que se le acoplen. Para favorecer la modularidad del diseño y el intercambio de piezas, se le realizaron unas acanaladuras para poder fijar mediante tornillos las distintas placas de respaldo.



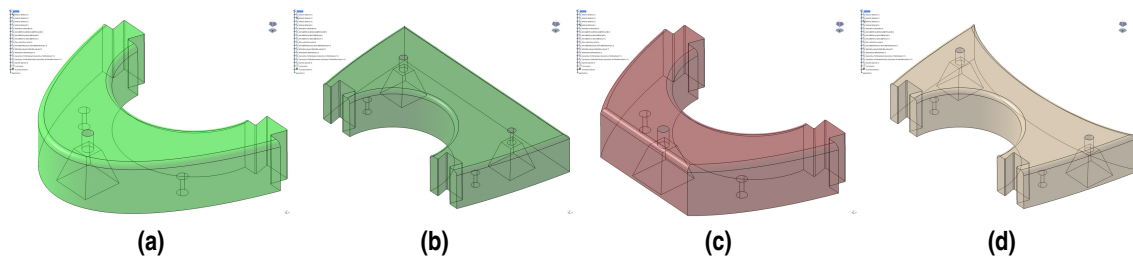
**Figura 2.16** Versión 5 utillaje modular definitivo: (a) Vista inferior de una de las placas de respaldo; (b) Encaje de la pieza de apriete.

En la *Figura 2.16 (a)* se pueden ver los orificios de centrado que encajan con los realizados en la base fija *Figura 2.15*. El sistema de apriete entre placa de respaldo y prensachapa consistirá en unir ambos mediante tornillos pasantes. Para ello se han realizado unos vaciados en la parte inferior de las distintas piezas que componen las placas de respaldo *Figura 2.16 (a) y (b)* donde se introducirán unos prismas que permitirán un mayor apriete. Estos prismas contarán con un rebaje, para tener en cuenta la resolución y expansión del PLA durante la impresión.



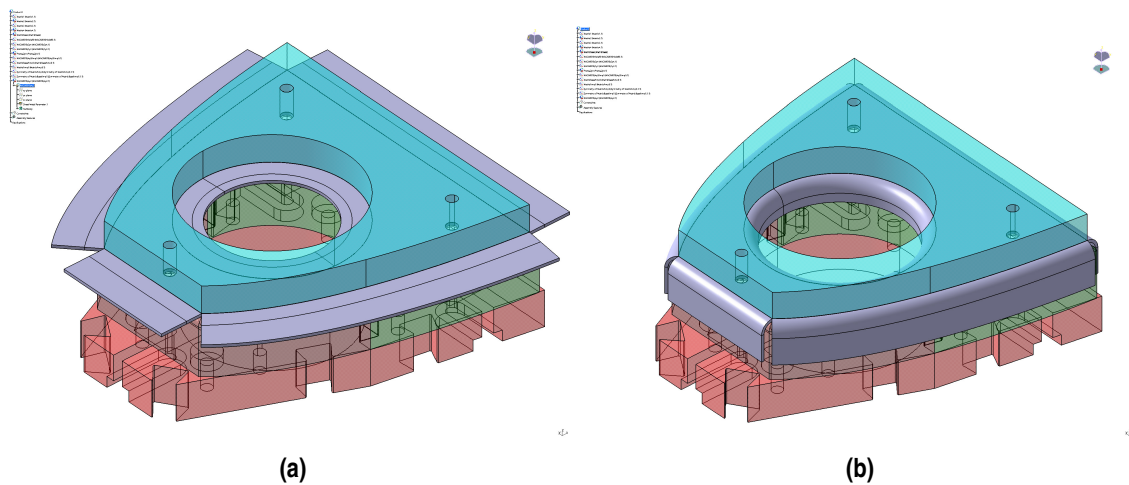
**Figura 2.17** Versión 5 utillaje modular definitivo: Vista de uno de los montajes posibles.

En la *Figura 2.17* se puede ver como sería el montaje de una de las configuraciones posibles. Así mismo se puede observar como sería la alineación entre la acanaladura realizada en la base fija (pieza roja), la pieza de apriete, la placa de respaldo y su correspondiente prensachapa. Si las costillas a conformar presentan taladros de utillaje distintos, la acanaladura permitirá, simplemente deslizando el tornillo, instalar una u otra pieza.



**Figura 2.18** Versión 5 utillaje modular definitivo: Ejemplo de las distintas piezas diseñadas para configurar placas de respaldo.

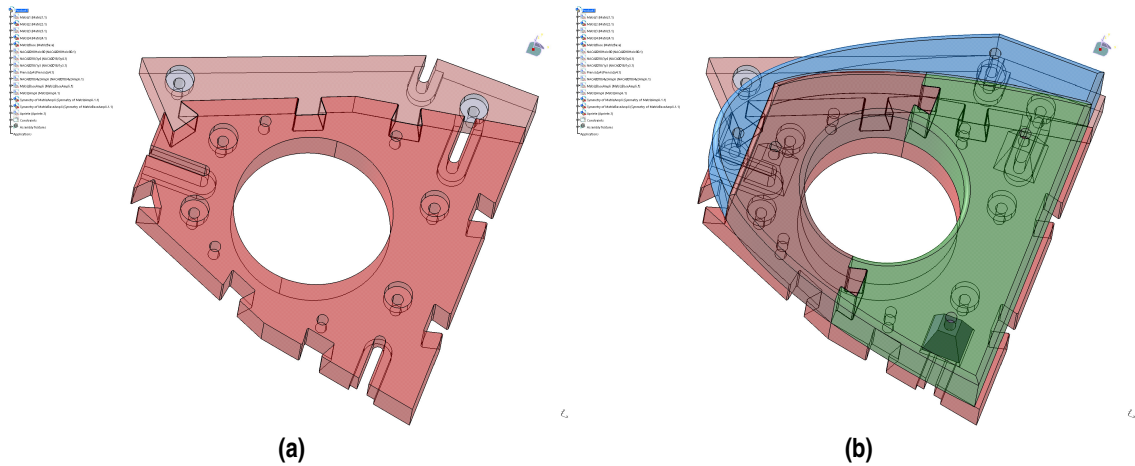
En la *Figura 2.18* puede observarse cómo los orificios que coinciden con los taladros de utillaje variarán de una configuración a otra.



**Figura 2.19** Versión 5 utillaje modular definitivo: (a) Conjunto ensamblado con costilla sin conformar; (b) Conjunto ensamblado con costilla conformada.

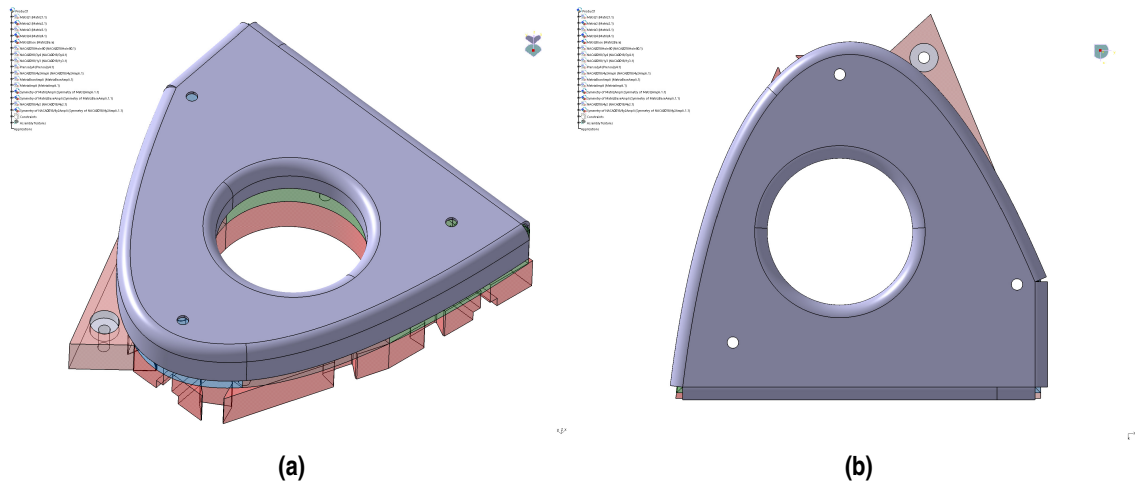
En la *Figura 2.19* se puede ver cómo quedaría una de las configuraciones posibles y su costilla correspondiente.

En la *Figura 2.20 (a)* se puede observar el útil diseñado para ampliar la base fija y cómo se ensamblaría en esta. Este útil de ampliación se fijará por tornillos a la máquina de CNC y presenta una acanaladura siguiendo la misma filosofía que el resto del diseño.



**Figura 2.20** Versión 5 utillaje modular definitivo: Ejemplo de las distintas piezas diseñadas para configurar placas de respaldo.

En la *Figura 2.20 (b)* se observar cómo quedaría el conjunto con el útil de ampliación ensamblado.



**Figura 2.21** Versión 5 utillaje modular definitivo: Vistas del conjunto ampliado y costilla que se obtendría con la configuración.

En la *Figura 2.21* se puede observar el tipo de costilla que se obtendría con los útiles añadidos. *Esto nos permite dar un enfoque sobre el alcance y las posibilidades de fabricación que nos permite este tipo de diseño de utillaje modular.*

En cuanto a las almenas cabe decir que fueron *estandarizadas*, para facilitar futuros desarrollos y agilizar el diseño. Además para tener en cuenta la resolución de la impresora, a las almenas machos es necesario realizarle una operación con la orden *Thickness Definition* durante su diseño. En la *Figura 2.21* puede verse que para nuestro caso el gap que hay que tener será de 0.25mm.



**Figura 2.22** Versión 5 utillaje modular definitivo: Zoom sobre acople entre almenas.

## 2.3 Metodología de prototipado rápido en CATIA

Para cumplir con los objetivos referentes al prototipado rápido, ha sido necesario desarrollar una metodología que permita obtener de la forma más simple y eficaz el diseño en CATIA de nuestro utillaje modular. Con ello se consigue establecer un flujo de acciones básicas que permiten a cualquier persona llegar a un diseño de utillaje base, al que posteriormente solo será necesario realizar las operaciones de modelado en CATIA que requiera el diseño del útil en cuestión.

### 2.3.1 Descripción del flujo establecido: Placa de respaldo

A continuación se dará una explicación de forma más visual y detallada, sobre las acciones metodológicas que se deben implementar en el entorno de CATIA para el fin que aquí se propone. La tecnología de fabricación mediante SPIF requiere una serie de herramientas/matrices, del *paso 1 al 11* se describirá la obtención de una *placa de respaldo* (*backing plate*) base y del *paso 12 al 15* la obtención de un *prensa chapa* base. Como ya se comentó anteriormente cuando se habla de "base" es porque se obtendrá la matriz en bruto a la cual posteriormente habrá que realizarle un post-proceso en CATIA para adecuarla a los requerimientos del diseño.

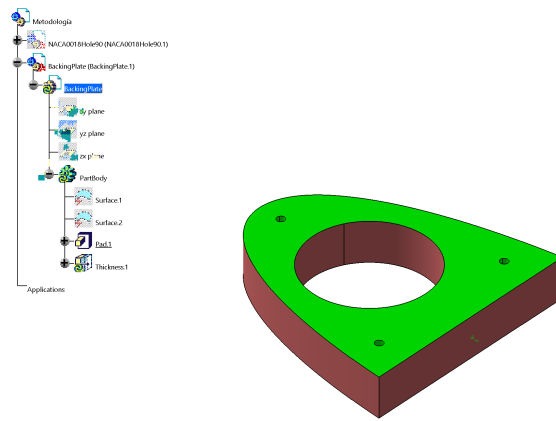
#### Etapas 1

Inicialmente a este paso y partiendo del CATPart del elemental aeronáutico que se quiere fabricar creamos un CATProduct con el mismo. En este mismo CATProduct *insertamos un nuevo CATPart*, en el que diseñaremos el útil que necesitaremos para fabricarlo.

Seleccionamos la instancia que pertenece al nuevo CATPart (la cual se ha llamado *Útil* para este caso), se *hace doble click* sobre su PartBody para activarla y poder trabajar sobre el mismo. Con esto lo que se ha buscado es poder diseñar el útil necesario para nuestro proceso de fabricación teniendo en todo momento la referencia del elemento a fabricar.





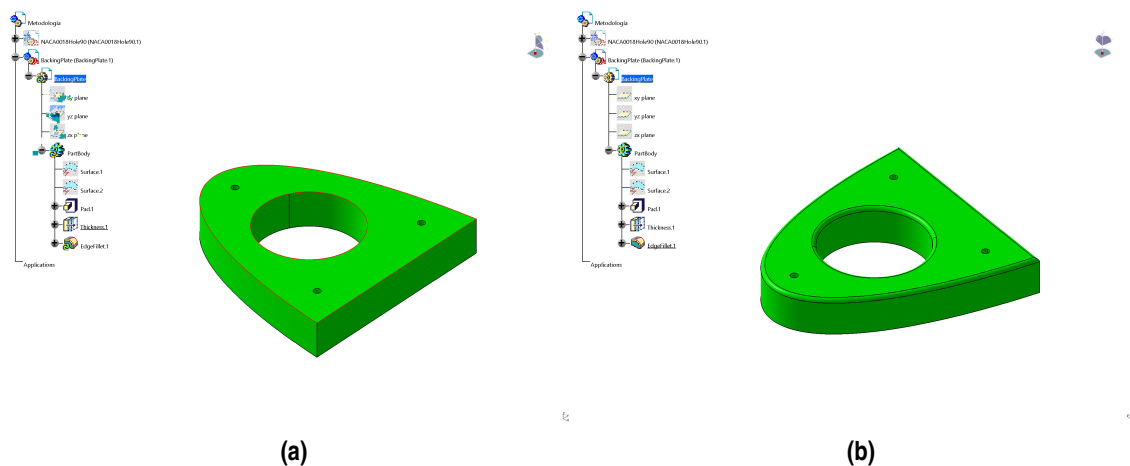


**Figura 2.25** Etapa 4 Placa de respaldo: aumento de espesor mediante Thickness Definition.

Con este paso se pretende buscar un gap entre la matriz y la pestaña del elemental, en nuestro caso dicho gap será de unos 2 mm por lo que como la chapa se doblará en un radio de 5 mm se le ha dado un espesor de 3 mm con la herramienta de CATIA que aquí comentamos. *El gap fue elegido en base a las experiencias adquiridas por el Departamento de Ingeniería de los Procesos de Fabricación durante sus investigaciones en otros proyectos sobre SPIF.*

#### Etapa 5

Aunque este paso no sería del todo necesario, se pensó en rebordear los bordes del backing plate que apoyaban justo con la chapa de metal, ya que al ser este de un material menos duro que el de la chapa a conformar; eliminar las aristas en la matriz evitaría posibles roturas de la misma debidas a la tensión creadas por la presión que la chapa le ejercerá durante su conformado. A su vez al otorgar ese rebordeado mediante la orden *Edge Fillet* eliminaremos dichas tensiones alargando la vida útil de la herramienta. Con lo comentado en el Paso 4 el radio que se ha dado para el rebordeado ha sido de 3 mm. Este sería el último paso para la creación en bruto del backing plate en cuestión. Una visualización del mismo puede verse en la siguiente figura.



**Figura 2.26** Etapa 5 Placa de respaldo: (a) Rebordeado con Edge Fillet; (b) Visualización placa de respaldo tras etapa 5 .

### 2.3.2 Descripción del flujo establecido: Prensachapa

Los pasos a seguir para desarrollar el prensachapa (blankholder) serán muy parecidos a los realizados para la placa de respaldo.

#### Etapa 1

Al igual que con el backing plate se parte de un *CATProduct* creado con el *CATPart* del elemental que se va a fabricar. En este TFG se ha seguido la metodología de usar el mismo *CATProduct* para desarrollar tanto el backing plate como el prensachapa, así no se perderán referencias y tendremos una vista completa del conjunto final. *Se inserta un nuevo CATPart* para el prensachapa.

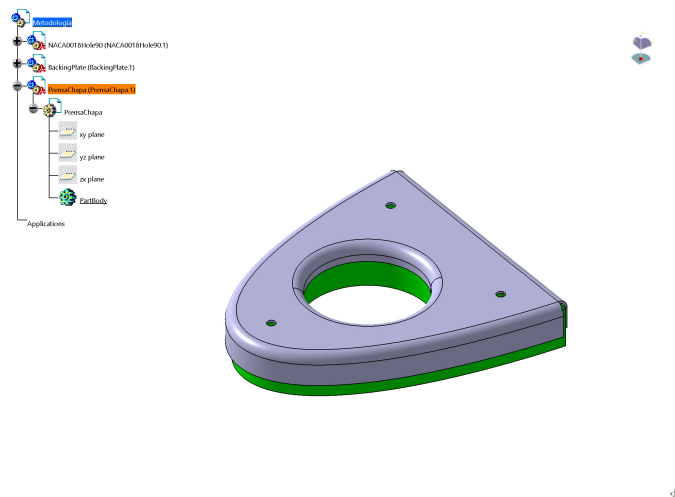


Figura 2.27 Etapa 1 Prensachapa: Inserción CATPart.

#### Etapa 2

Se selecciona la *superficie superior* de la costilla, que estará en contacto con el prensachapa.

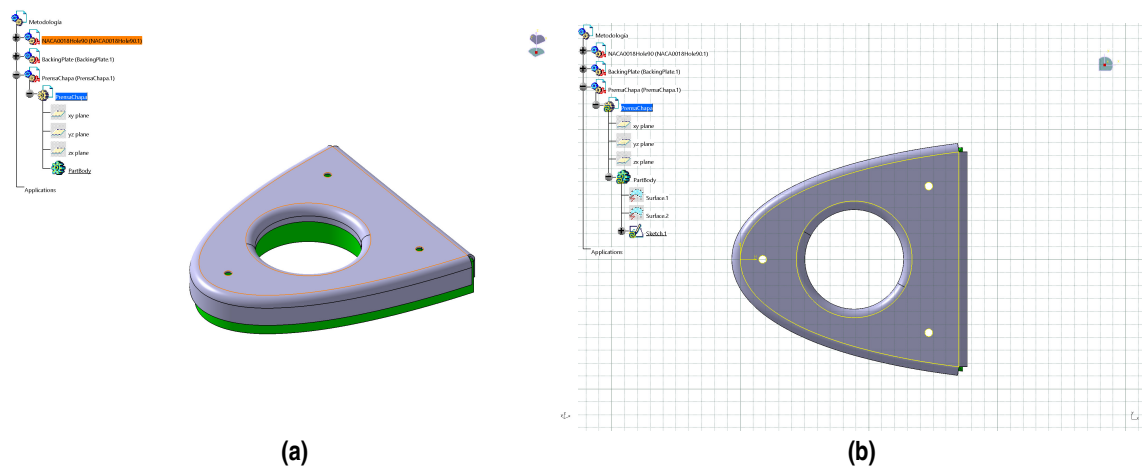


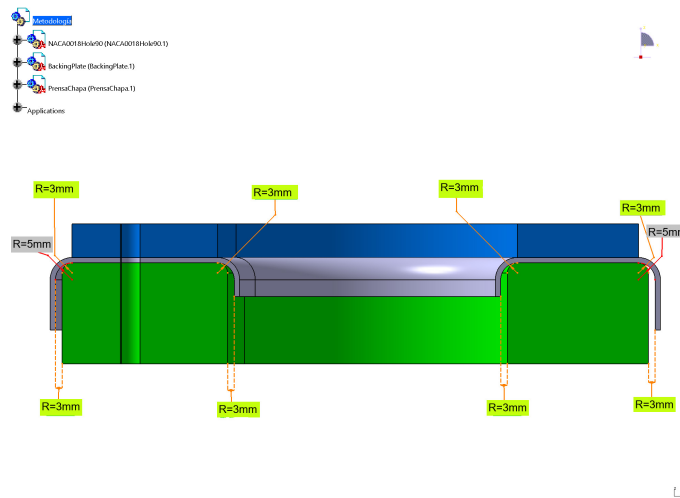
Figura 2.28 Etapa 2 Prensachapa: (a) Selección superficie de contacto superior del elemental; (b) Sketch con Project 3D Elements.

A continuación creamos un *Sketch* con ayuda de la herramienta *Project 3D Elements*. Obteniéndose la proyección del perfil de la costilla.





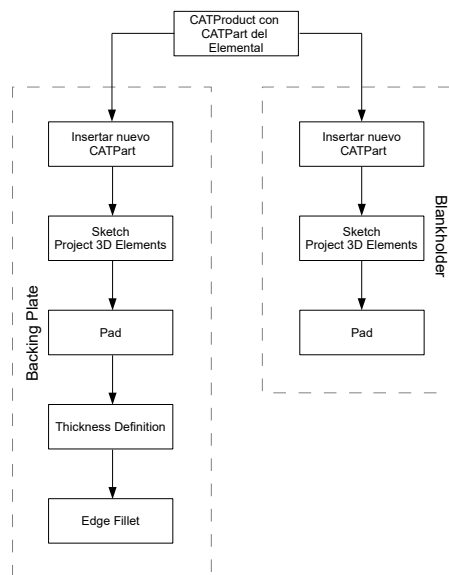
En la *Figura 2.31* se pueden observar los radios que se han obtenido para el backing plate así como el gap que hay entre backing plate y la chapa conformada.



**Figura 2.31** Detalles de los gaps y radios obtenidos.

### 2.3.4 Esquema del flujo

Una vez desarrollados los pasos de la metodología de diseño adoptada podemos resumir su flujo con el siguiente esquema:



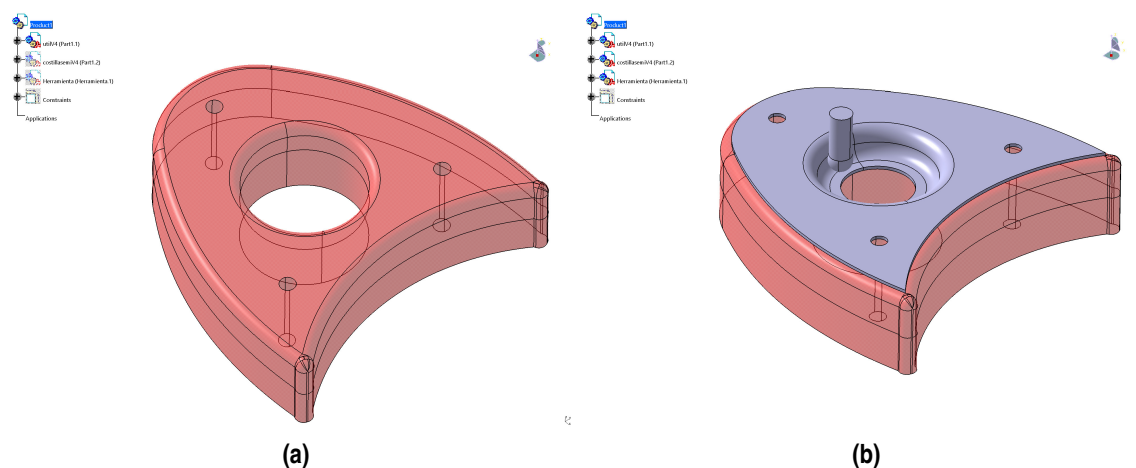
**Figura 2.32** Flujo de la metodología.

Como conclusión a esta sección se puede decir que el hecho de establecer esta metodología permite dar al concepto de *modularidad* una mayor versatilidad, ya que a partir unos pasos básicos podemos llegar a crear diferentes herramientas con una mínima cantidad de pasos adicionales según el requerimiento que se necesite en cada una de ellas.

### 3 Análisis numérico en CATIA

A medida que se iba avanzando en los desarrollos de las distintas versiones del diseño, se decidió realizar un análisis numérico para tener los primeros ordenes de magnitud y comprobar la posibilidad de aunar ambas tecnologías. Es decir, ver que realmente era posible con los medios de que se disponen en el laboratorio y cumpliendo los requisitos que se buscan, fabricar un elemental por SPIF usando para ello herramientas impresas en material polimérico. En una de las primeras reuniones para concretar los puntos que se tratarían en este TFG, se realizaron unos pequeños cálculos para tener una primera aproximación antes de comenzar con el mismo. Además se acordó que se usaría para el conformado una herramienta semiesférica de un diámetro en torno a 12 mm y que para el proceso de SPIF la *fuerza aplicada* estaría en torno a los 1800N.

Unos cálculos iniciales realizados en base a los datos comentados y a las experiencias observadas en este campo Centeno et al., 2012, estimaron a grosso modo que las tensiones en la placa de respaldo impresa estarían en torno a los 10 MPA. Con el fin de corroborar esto, tener un orden de magnitud más fiable y sin tener que salir del entorno de CATIA se decidió analizar con el módulo Generative Structural Analysis de Analysis & Simulation un *CATProduct* que representara el conformado de un *hole-flanging* usando como matriz un diseño *Versión 4* del útil.



**Figura 3.1** (a) Versión 4 del útil empleada en el análisis; (b) Montaje analizado.

*En un principio se eligió aplicar al útil un material de Nylon, ya que se pensó utilizar aquel material polimérico que proporcionara mejores propiedades mecánicas y estuviera a nuestro alcance.*

**Tabla 3.1** Propiedades mecánicas Nylon.

Nylon	
Módulo de Young (E)	3100 MPa
Coeficiente de Poisson	0,4
Densidad	1150 Kg/m <sup>3</sup>

Las propiedades mecánicas del material para la costilla serán las referentes a un *aluminio 7075O*.

**Tabla 3.2** Propiedades mecánicas Al 7075O.

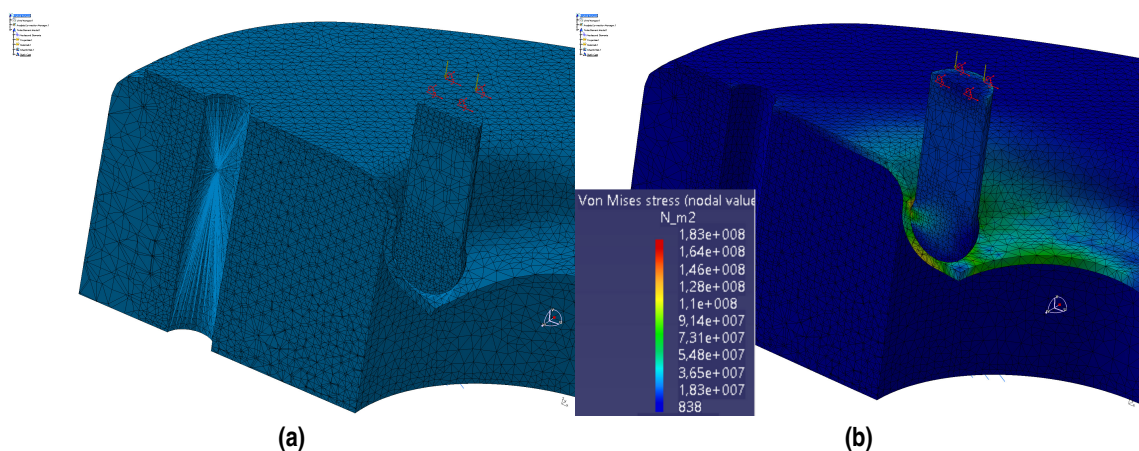
Al 7075O	
Módulo de Young (E)	70000 MPa
Coeficiente de Poisson	0,32
Densidad	2810 Kg/m <sup>3</sup>

El material de la herramienta semiesférica es acero con las siguientes propiedades.

**Tabla 3.3** Propiedades mecánicas Acero.

Acero	
Módulo de Young (E)	200000 MPa
Coeficiente de Poisson	0,266
Densidad	7860 Kg/m <sup>3</sup>

*Se propuso analizar la fase del proceso de SPIF en la que el hole-flanging se encuentra en la mitad del proceso de conformado por ser el momento en el que mayores tensiones habrán. Además con el fin de estar siempre en el caso más crítico se decidió aplicar una fuerza sobre la herramienta de 2000N y se modeló el conjunto para que la chapa y la matriz tuvieran el mismo radio sin que hubiera un gap entre ambas. Tras realizar el análisis estático se obtuvieron los siguientes valores de tensiones en el conjunto.*

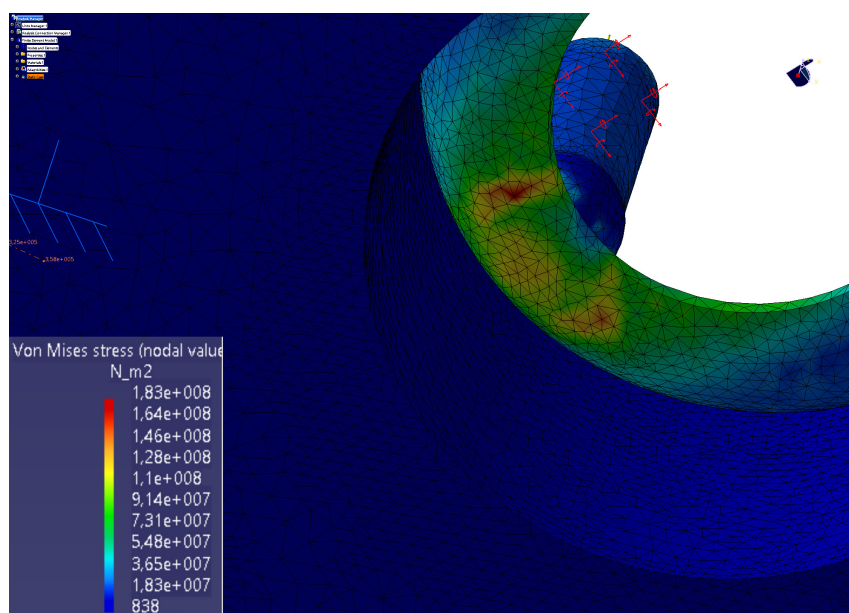


**Figura 3.2** (a) Visualización del mallado; (b) Resultado de las tensiones obtenidas.

El número de nodos de la malla es de 128007 y cuenta con 620708 elementos.

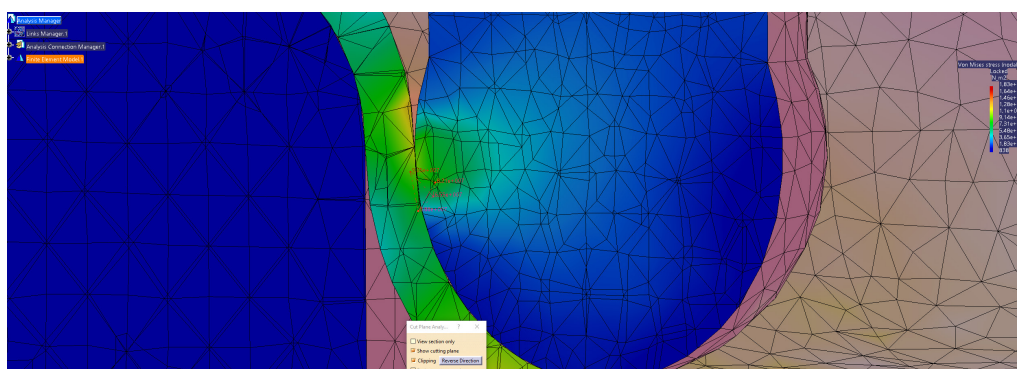
A continuación se mostrarán distintas vistas para poder apreciar con más detalle los valores y lugares de los resultados obtenidos:

Se puede observar en las *Figura 3.3* como las mayores tensiones aparecen en la chapa que se está conformando. En concreto en la superficie inferior aparecen las mayores tensiones con un valor en torno a los 183 MPa, formando un perfil circular que coincide con el de la herramienta que está deformando esa zona.



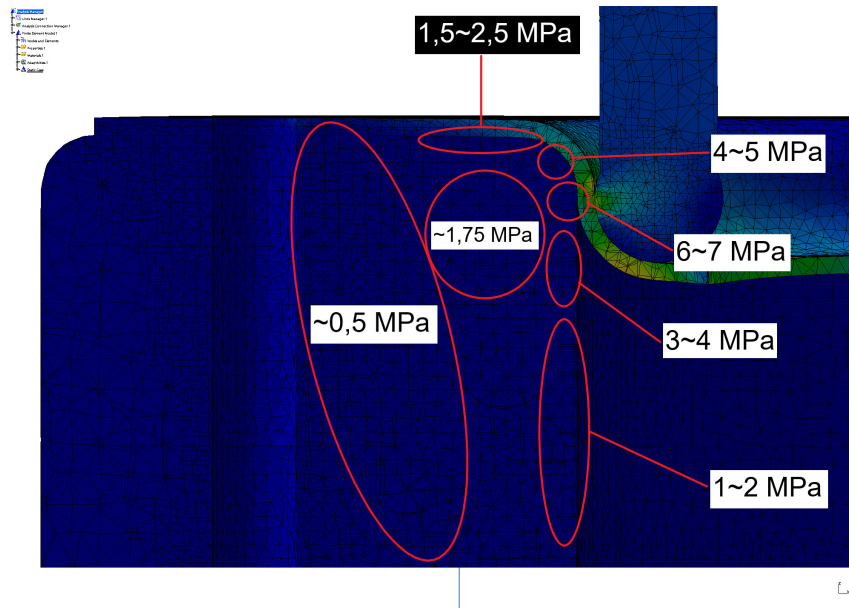
**Figura 3.3** Visualización tensiones obtenidas desde una vista inferior.

En la *Figura 3.4* se observa como justo en la zona intermedia del hole-flanging los resultados muestran que las tensiones alcanzan valores significativos.



**Figura 3.4** Zoom sobre la zona del contacto entre herramienta, chapa y placa de respaldo.

En la *Figura 3.5* se muestran los valores obtenidos para la placa de respaldo, se puede observar como los mayores valores se presentan en la zona del rebordeado que está en contacto con la chapa, en concreto la mayor tensión obtenida en la placa de respaldo se encuentra en la mitad del hole-flanging a la misma altura que los máximos en la herramienta tal y como se esperaba antes de este análisis. A medida que nos alejamos de esta zona las tensiones van disminuyendo.



**Figura 3.5** Resultados obtenidos en el backing plate.

Después de una reunión en la que se presentaron los resultados. En base a estos datos y apoyados en los resultados obtenidos por Leacock en Leacock et al., 2017 con el estirado de chapa usando herramientas impresas en PLA, se decidió el *uso de PLA* por ser sus características mecánicas suficientes (Farah; Anderson y Langer, 2016 y Torres et al., 2015) y de esta forma usar un material mucho más barato, fácil de imprimir y conocido de lo que pudiera ser el Nylon.



## 4 Fabricación por FDM del utillaje modular definitivo

Una vez que el *diseño de utillaje modular* ha quedado cerrado y analizado, se procede a su fabricación por FDM. Uno de los objetivos a cumplir en este trabajo es conseguir una propuesta más económica y accesible que las existentes. Se optó por esta tecnología de impresión ya que es una técnica en auge en la industria aeronáutica que permite una gran flexibilidad. Todo ello nos permite reforzar la idea que venimos desarrollando en este proyecto, así como cumplir con los objetivos propuestos.

La impresión 3D nos ofrece una extensión o continuación de la metodología tratada en el *Capítulo 2*, ya que una vez se tienen todos los archivos *CATPart finales* solo hay que guardarlos en formato *STL* para, después de un procesamiento con un software auxiliar, poder obtener las piezas de forma sencilla y rápida.

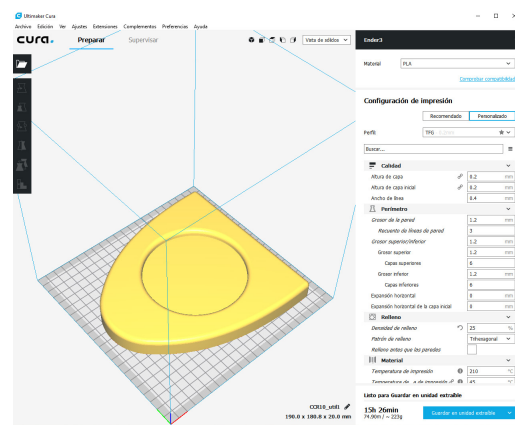
### 4.1 Tipo de impresora y software utilizados para la fabricación por FDM

Se ha usado una impresora de extrusión de material de tipo *cartesiana* por ser de las más comunes en el mercado, aunque hubiera servido cualquiera de los otros tipos existentes para FDM. Si bien las de tipo cartesiano son ampliamente conocidas por el público y relativamente sencillas para iniciarse en el mundo de la impresión 3D. En concreto para este proyecto el autor adquirió una unidad económica con el fin de demostrar lo que aquí se comenta y fabricar los útiles a un bajo coste.

En cuanto al software de corte para generar el g-code que leerá la impresora se ha utilizado la aplicación de código abierto Ultimaker Cura 3.3.1.



(a)



(b)

Figura 4.1 (a) Impresora utilizada para el TFG

(b) Software Ultimaker Cura 3.3.1.

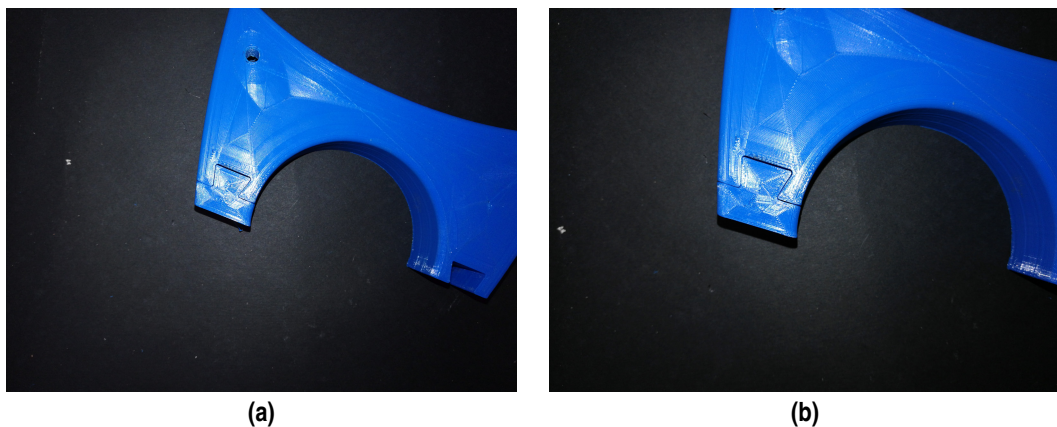
## 4.2 Impresión del utillaje modular definitivo

Con los resultados favorables obtenidos en los análisis, se decidió llevar a cabo la impresión de todas las piezas que componían el conjunto del concepto modular definitivo. Debido a lo comentado en la *Subsección 2.2.2* y más concretamente en la *Figura 2.22*, previamente a la impresión de dichas piezas, debido a las almenas que presenta el diseño para hacerlo modular y que éstas tienen que encajar unas con otras; se hicieron una serie de pruebas de impresión con el fin de tener un rango de la resolución que se podía obtener con la impresora disponible. Se utilizó la matriz 3 ya impresa, la cual tiene una almena hembra y se imprimieron varias almenas machos con distintos rebajes para comprobar el encaje entre ambas. Se obtuvo que *la resolución de la impresora empleada para este TFG está en un rango de entre 0,2mm y 0,25mm*, aunque con 0,2mm las piezas encajan de forma justa y más fácilmente a medida que se produce desgaste entre ambas, *se optó por dar un gap de 0,25mm* a las almenas para facilitar su extracción una vez montadas en el conjunto completo y adaptadas en la base que se fijará a la máquina de control numérico.



**Figura 4.2** Almenas de prueba impresas con 0mm, 0,2mm y 0,25mm de rebaje respectivamente.

Como se puede observar en la siguiente imagen no existe una gran diferencia a simple vista del ajuste con almenas rebajadas 0,2mm o 0,25mm. Para la almena sin rebajar, el encaje era imposible debido a que, aunque en CATIA se hayan dibujado ambas superficies en contacto; el PLA al fundir y ser depositado por el extrusor presenta un efecto de expansión.



**Figura 4.3** (a) Encaje almenas 0,2mm de gap.

(b) Encaje almenas 0,25mm de gap.



### 4.2.1 Configuración de impresión, parámetros y tiempos

Se pretende que el proceso de diseño y fabricación de un útil pueda ser realizado en 8 horas o menos, coincidiendo con el tiempo normal que suele durar una jornada de trabajo, ante la necesidad de introducir una modificación en el elemental a fabricar o una nueva configuración del mismo. Por ello se han tratado de ajustar los parámetros de velocidad de impresión para poder cumplir con este objetivo.

Cabe decir que en este aspecto, el tipo y la calidad de la impresora juegan un papel muy importante. Por ejemplo una impresora tipo delta será mucho más rápida que una tipo cartesiana y dentro de las del mismo tipo impresoras con mejores calidades permitirán velocidades mayores. También jugará un papel importante la experiencia del usuario y la cantidad de veces que haya podido experimentar y aprender hasta poder llegar a un punto óptimo entre calidad buscada y velocidad de impresión. De cualquier forma el por qué de la elección de la máquina usada para este trabajo ya se comentó en la *Sección 4.1* de este mismo capítulo.

A continuación se adjunta una *Tabla 4.1* en la que se pueden ver los parámetros de velocidad más óptimos que se han podido alcanzar en base a la experiencias adquiridas por el autor durante este proyecto.

**Tabla 4.1** Parámetros de impresión comunes para todas las piezas.

<b>Calidad</b>	
Altura de capa	0,2mm
Altura de capa inicial	0,2mm
Ancho de línea	0,4mm
<b>Relleno</b>	
Patrón de relleno	Trihexagonal
<b>Material</b>	
Temperatura de impresión	210
Tª de la cama de impresión	45
<b>Velocidad</b>	
Velocidad de relleno	60mm/s
Velocidad de pared exterior	30mm/s
Velocidad de pared interior	60mm/s
Velocidad de relleno del soporte	15mm/s
Velocidad de impresión de la capa inicial	20mm/s
Velocidad de desplazamiento de la capa inicial	15mm/s
Velocidad de falda/borde	30mm/s
Número de capas más lentas	2

En cuanto a las velocidades, comentar que con una *velocidad de pared exterior* inferior obtenemos una mejor calidad final. Se disminuyó la *velocidad superior/inferior* para permitir un buen fijado a la cama y un buen acabado en la cara superior. Para afianzar los soportes se disminuyó la *velocidad de relleno del soporte*. Con el fin de mejorar la adherencia se disminuyó la *velocidad de impresión de la capa inicial* y para evitar que las partes impresas se separen de la placa de impresión se disminuyó la *velocidad de desplazamiento de la capa inicial*.

Como se comprobó en los resultados obtenidos del análisis anterior *Capítulo 3 Figura 3.5* las mayores tensiones se encuentran en las paredes de la matriz, por lo que se decidió dotar a éstas de mayor espesor que las caras superior e inferior. De esta forma el útil será lo suficientemente resistente para soportar las cargas durante el conformado del elemental y a su vez se ahorrará en material y tiempo de impresión.

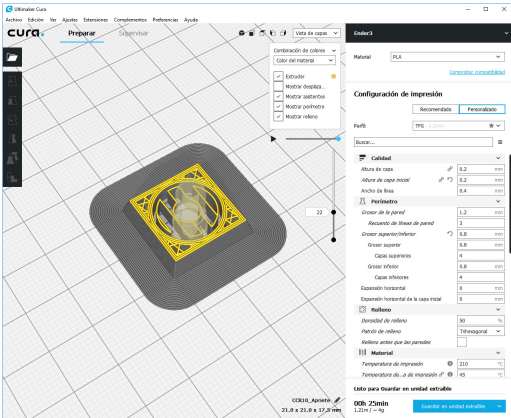
**Procesado de las piezas con Ultimaker Cura 3.3.1**

Los parámetros que se han establecidos para el perímetro de la pieza son los siguientes:

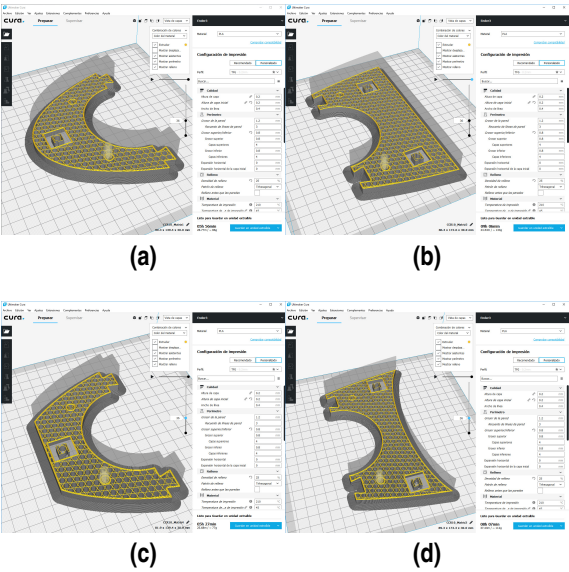
**Tabla 4.2** Parámetros de impresión para el perímetro de la pieza.

Perímetro	
Grosor de la pared	1,2mm
Recuento de líneas de pared	3
Grosor superior/inferior	0,8mm
Capas superiores/inferiores	4

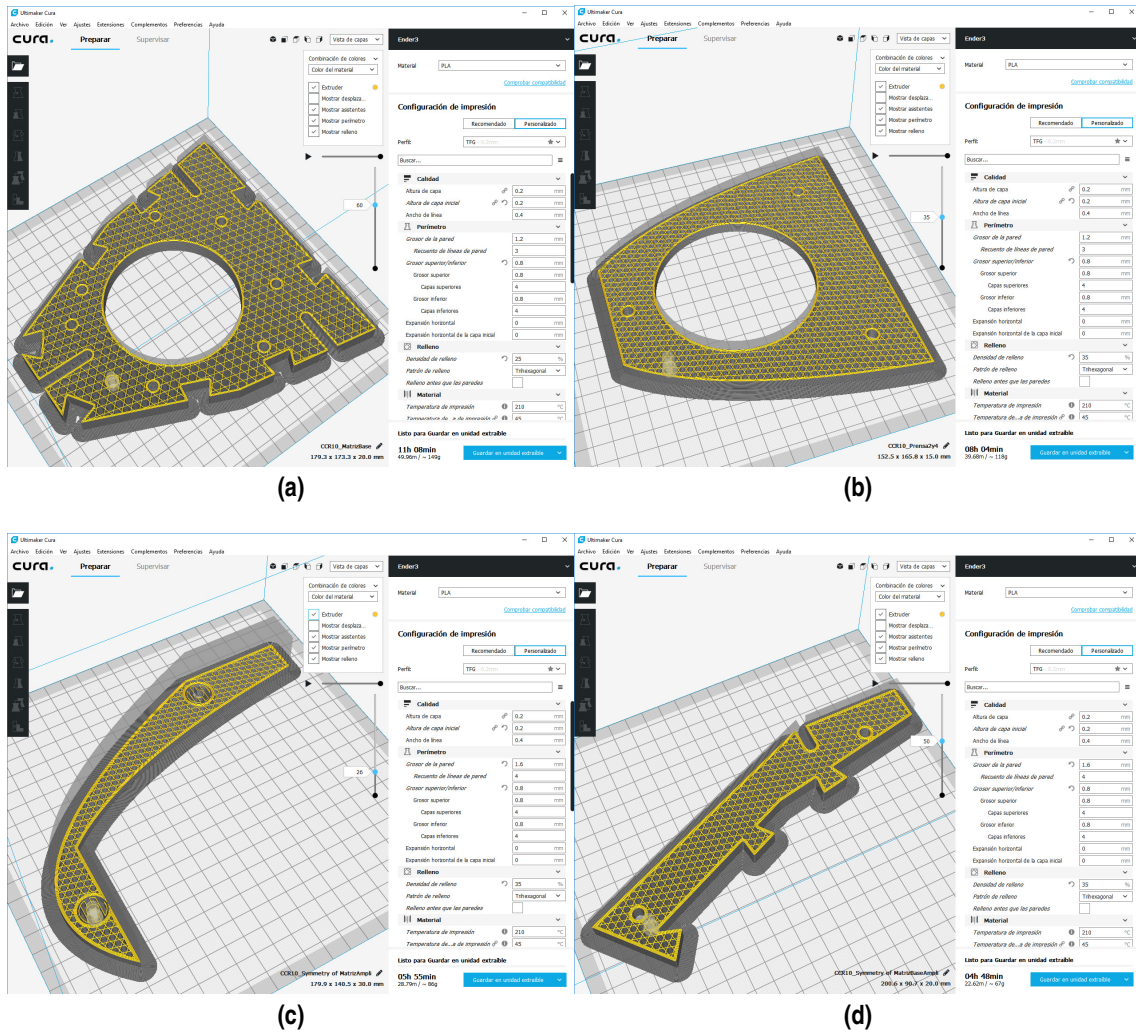
Para la pieza de apriete *Figura 4.4* la densidad de relleno es del 50 %, con el fin de hacerla lo más maciza posible y aguante el apriete de los tornillos. Y para las matrices de la *Figura 4.5* del 25 %.



**Figura 4.4** Pieza de apriete.



**Figura 4.5** Procesado de placas de respaldo con Ultimaker Cura 3.1.1: (a) Matriz 1; (b) Matriz 2; (c) Matriz 4; (c) Matriz 3.



**Figura 4.6** (a) Base fija; (b) Prensachapa; (c) Útil de ampliación; (d) Base fija de ampliación.

La base fija *Figura 4.6 (a)* tendrá una densidad de relleno del 25% mientras que el prensachapa tendrá una densidad del 35%, ya que al tener menos espesor necesita un poco más de refuerzo interno.

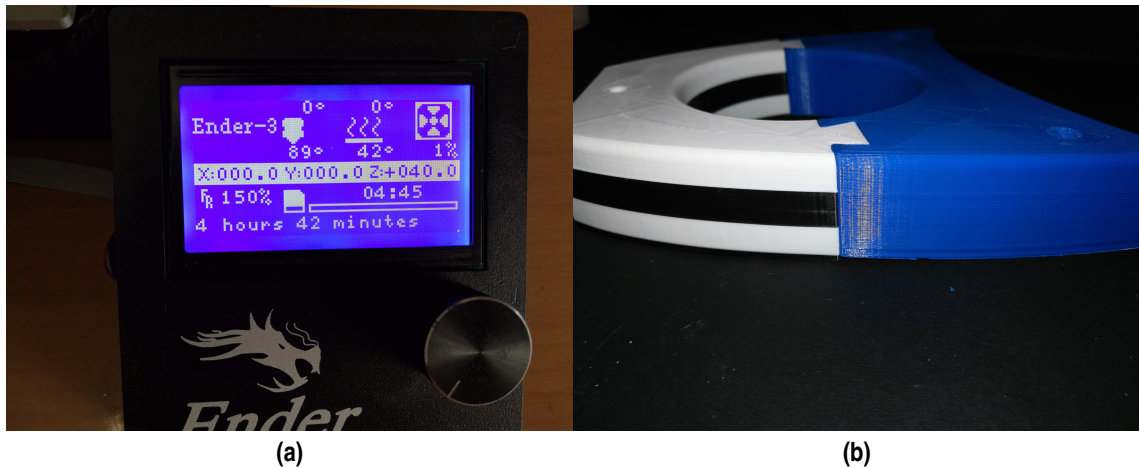
Para las piezas del útil de ampliación *Figura 4.6 (c)* y base de ampliación *Figura 4.6 (d)* se aumentó el grosor de la pared a 1,6 mm y una densidad de relleno del 35%, ya que son piezas más delgadas que las anteriores.

Tabla 4.3 Tiempos de fabricación y consumo de material.

	Tiempo de fabricación	Consumo de material
Apriete	00h 25min	4g
Matriz1	05h 56min	86g
Matriz2	09h 06min	133g
Matriz3	08h 07min	112g
Matriz4	05h 27min	77g
MatrizBase	11h 08min	149g
Prensa2y4	08h 04min	118g
MatrizAmpli	05h 55min	86g
MatrizBaseAmpli	04h 48min	67g
<b>Tiempo total</b>	<b>68h</b>	
<b>Consumo de material total</b>		<b>965g</b>

La base fija *Figura 4.6 (a)* es la que mayor tiempo de impresión conlleva, sin embargo como se ha diseñado para ser fija solo se imprimirá una vez. Las piezas con las que se construyen las distintas configuraciones de placas de respaldo si se encuentran en torno a las 8 horas de fabricación. También se debe tener en cuenta, que para las primeras piezas se decidió otorgarle unas características mejores con el fin de hacerlas más duraderas.

La intención es conseguir que una pieza pueda diseñarse y fabricarse en unas 8 horas de trabajo. En un futuro se podría seguir optimizando los parámetros del proceso, para aumentar las velocidades de impresión y conseguir aún más los tiempos de fabricación de las partes modulares para la implementación de costillas nuevas. Para ello durante una prueba de impresión se decidió aumentar un 50 % la velocidad de impresión *Figura 4.7 (a)*. El tiempo de fabricación de la pieza (*Matriz 4*) para esta prueba fue de *4h 42min*, observando la *Tabla 4.3* se puede observar como con este aumento de velocidad se produce un ahorro de tiempo de *45 minutos* aproximadamente.



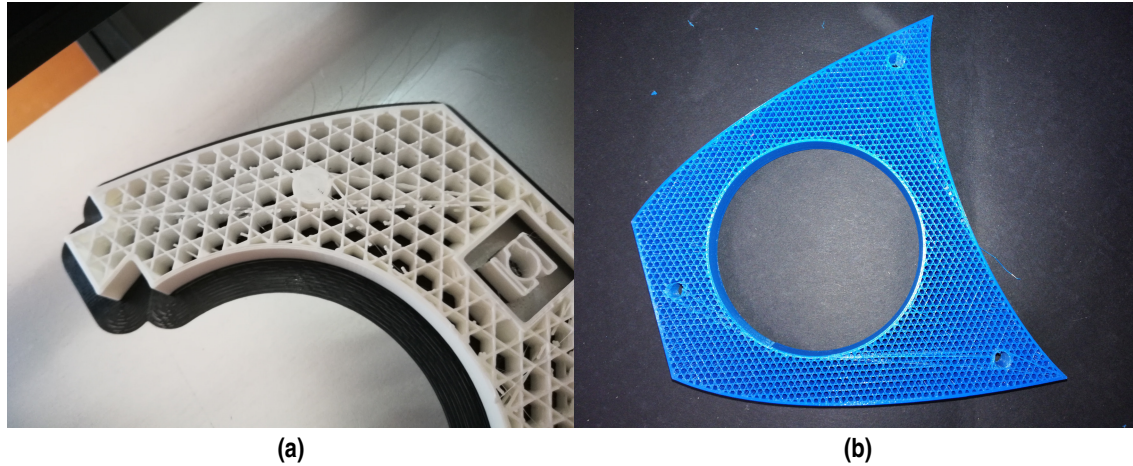
**Figura 4.7** (a) Duración del proceso de impresión a 150 % de velocidad; (b) Visualización encaje y calidad de las piezas.

En la *Figura 4.7 (b)* se puede observar como la calidad de la pieza obtenida (blanco y negro) es muy aceptable, además de como ajusta con otra pieza impresa a una velocidad menor sin ningún problema. Uno de los problemas que conlleva el hecho de aumentar la velocidad, fue el observado durante dicha prueba de impresión, *Figura 4.8 (a)* donde se puede ver como el extrusor al tener mayor inercia no consigue depositar de forma correcta el material durante el proceso de impresión del relleno, provocándose pequeños huecos



debido a la falta de material.

Otra posible mejora en la optimización de tiempos extraída de Leacock et al., 2017, fue la realizada durante la impresión de uno de los prensachapas *Figura 4.8 (b)*. Consiste en no imprimir la primera capa de la pieza, quedando el relleno a la vista. Con un ahorro de unos 20 minutos en este caso.

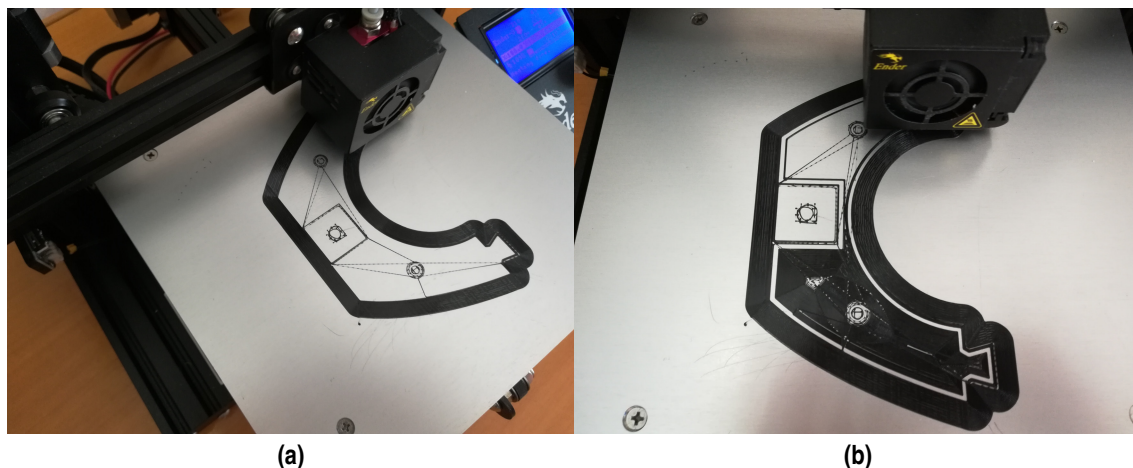


**Figura 4.8** (a) Problemas surgidos con el aumento de velocidad; (b) Prensachapa sin primera capa rellena.

#### 4.2.2 Ejemplo del proceso de impresión de una pieza

En esta subsección se va a mostrar con ejemplos gráficos como fue el proceso de impresión de la *matriz 4*, este proceso será similar al resto de piezas impresas para este trabajo. Primeramente se hace un precalentamiento del extrusor y la cama a la temperatura adecuada para el PLA, además se trataba la cama caliente con laca para obtener una mayor fijación de la primera capa.

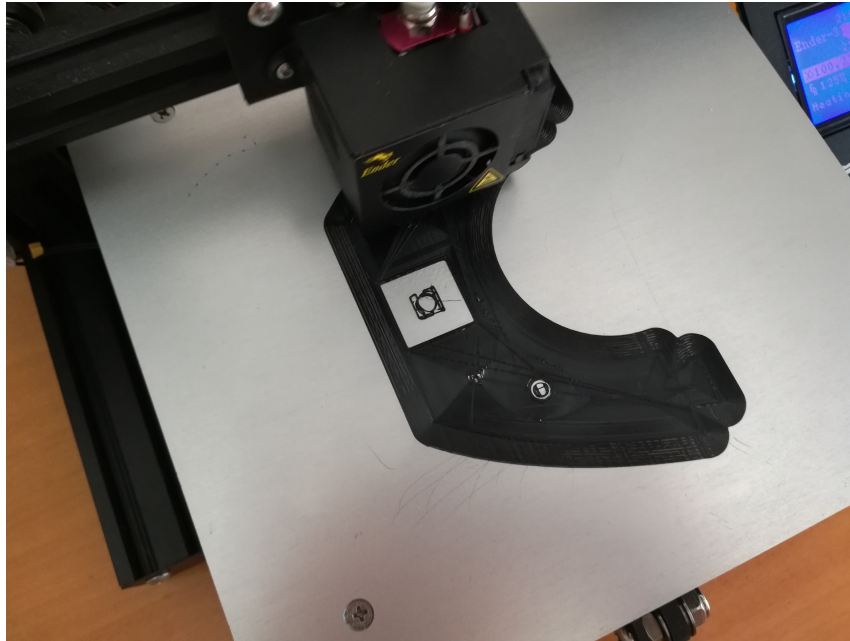
A parte de la laca también se decidió mejorar la adherencia a la placa de impresión mediante un *borde con un ancho de 7mm y 18 líneas*, con esto y la laca se consiguió *evitar el efecto de warping* que apareció en piezas iniciales. Para facilitar la impresión de voladizos se configuró la generación de soportes con un patrón en zigzag.



**Figura 4.9** (a) Impresión del borde y primera capa de soportes; (b) Proceso de impresión capa 1 .

En la *Figura 4.7* se aprecia como serán los movimientos del extrusor durante esta etapa. Una vez impreso el borde se imprime la primera capa inferior.

La superficie inferior de la pieza posee un grosor de 0,8mm distribuido en 4 capas.



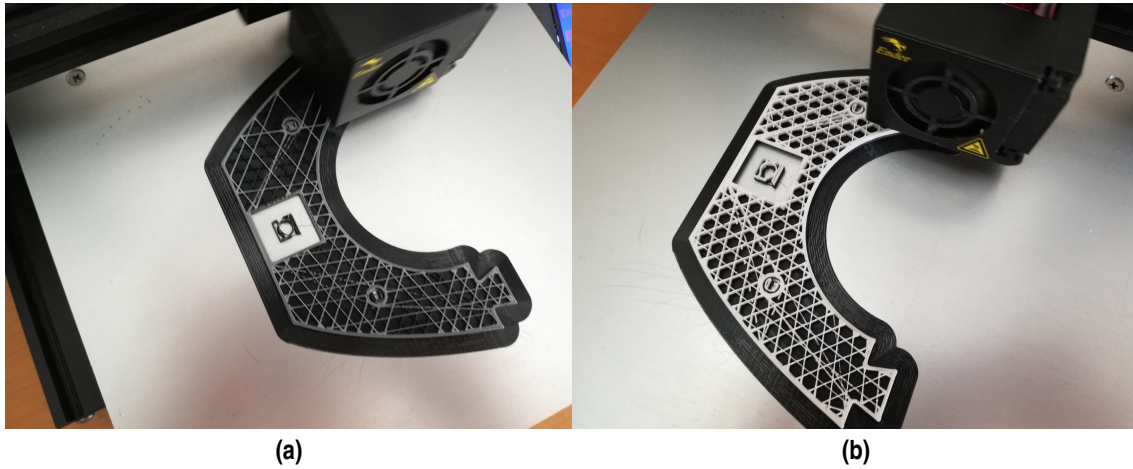
**Figura 4.10** Proceso de impresión capa 4.

Una vez terminada la pared inferior se comienza con el relleno.



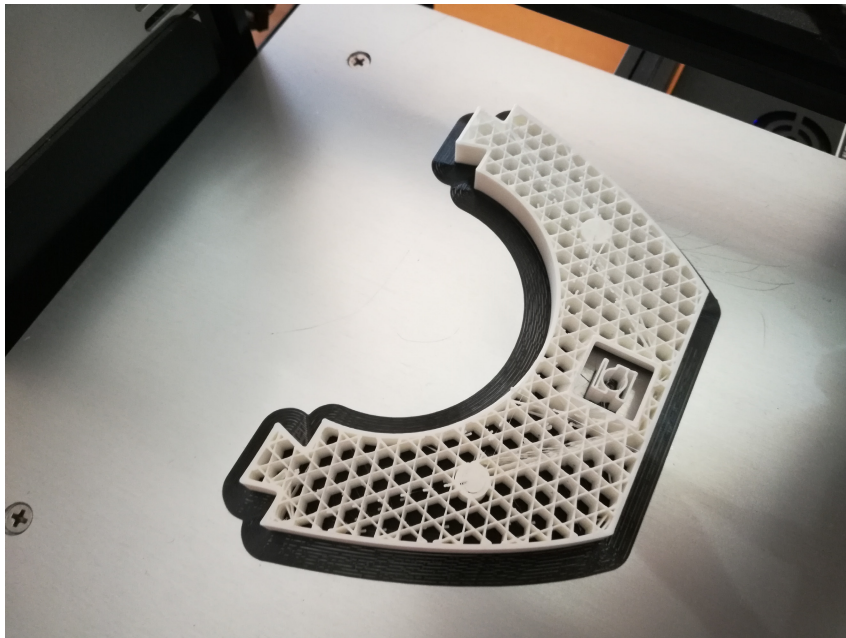
**Figura 4.11** Proceso de impresión capa 5.

En la siguiente figura se decidió pausar el proceso para cambiar el color del filamento con el fin de tener mejor contraste y poder observar el patrón que sigue el extrusor durante la realización del relleno.



**Figura 4.12** (a) Proceso de impresión capa 8; (b) Proceso de impresión capa 12 .

Una vez se llega a la capa 51 (1cm) se completan los dos orificios que servirán para centrar la placa de respaldo en el útil fijo.



**Figura 4.13** Proceso de impresión capa 51.



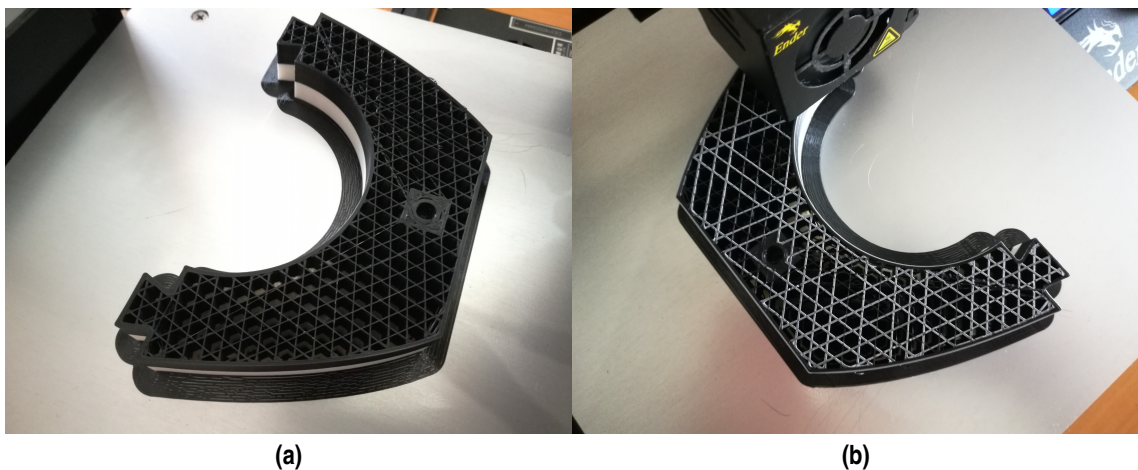
Se volvió a pausar el proceso y cambiar el filamento para poder observar los movimientos del extrusor mientras se realiza el relleno.



**Figura 4.14** (a) Proceso de impresión capa 55; (b) Proceso de impresión capa 56 .

A partir de la capa 101 (2cm) se comienza a imprimir la capa superior de la zona del vaciado piramidal donde irá encajada la pieza de apriete y donde se encuentra el orificio por donde pasará el tornillo que apriete con el prensachapa.

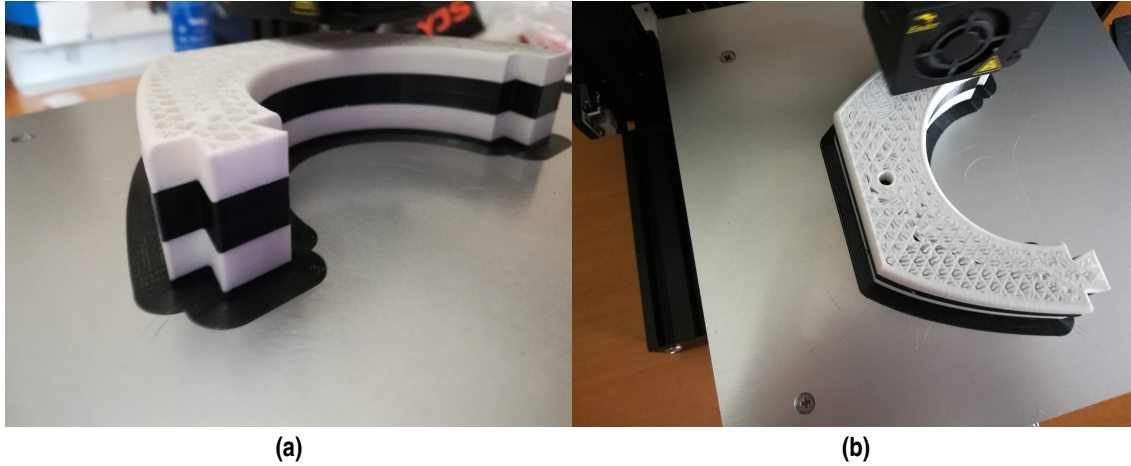
Se volvió a cambiar el filamento para poder observar cómo había cambiado el patrón del extrusor durante el relleno.



**Figura 4.15** (a) Proceso de impresión capa 102; (b) Proceso de impresión capa 105.

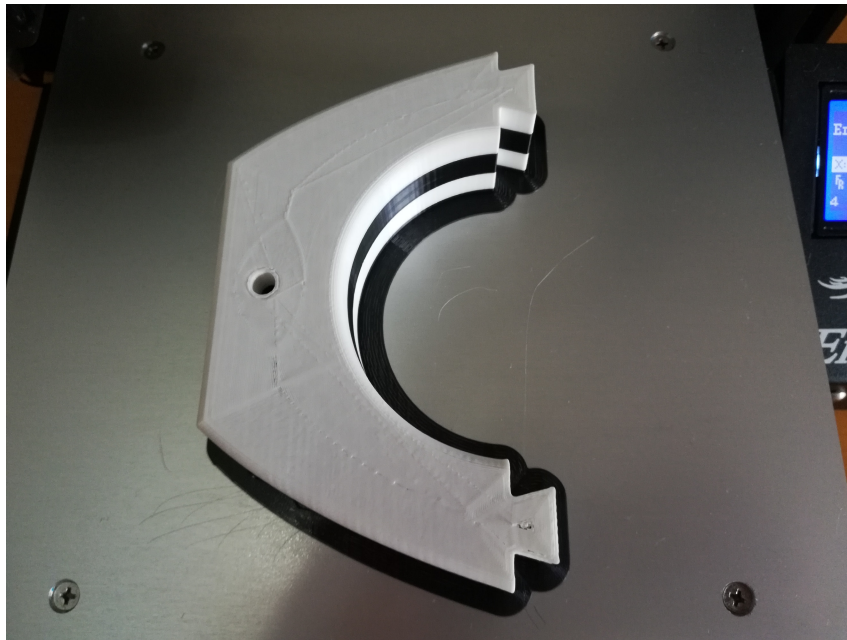


Una vez se llega a la capa 146 se puede observar como ya está formado el borde del perfil [Figura 4.14 (a)]. A partir de la capa 147 y hasta la 150 se completa la superficie superior de la pieza *Figura 4.14 (b)*, uno de los motivos de reducir la velocidad en la capa superior fue para permitir que el filamento tuviera tiempo de enfriar bien y afianzarse para poder cubrir todos los huecos del relleno.



**Figura 4.16** (a) Proceso de impresión capa 146; (b) Proceso de impresión capa 147 .

En la siguiente *Figura 4.15* se puede observar la pieza impresa finalizada.

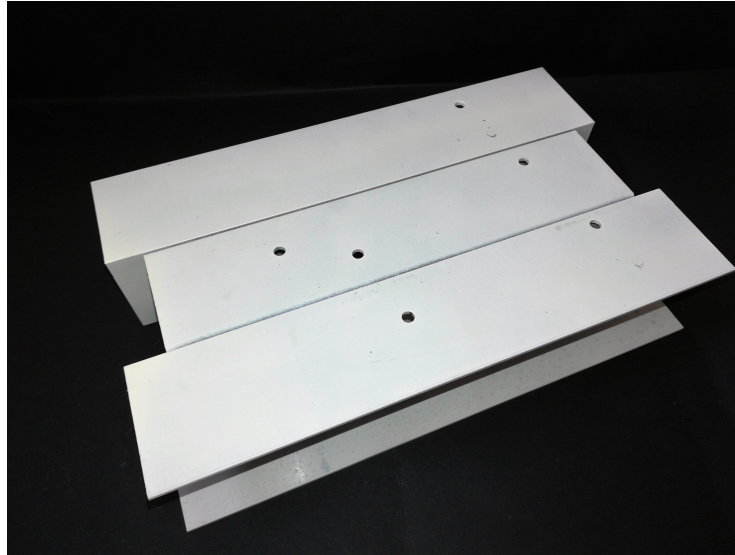


**Figura 4.17** Pieza acabada.

### 4.3 Proceso de montaje de los útiles para la fabricación de los distintos elementales

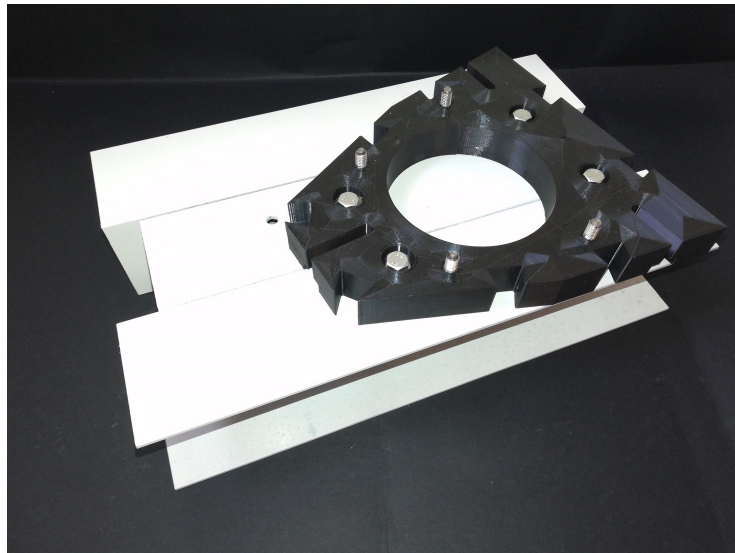
En esta sección se va a mostrar cómo sería el proceso de montaje de los distintos útiles impresos. Con esta combinación de matrices elegidas se podrán fabricar 3 costillas distintas de las 5 posibles.

Se fabricó un útil metálico el cual irá fijado a la máquina de control numérico y servirá de apoyo para las bases impresas. A este útil metálico se le han realizado varios taladros coincidentes con los agujeros diseñados en las bases fijas de nuestro concepto.



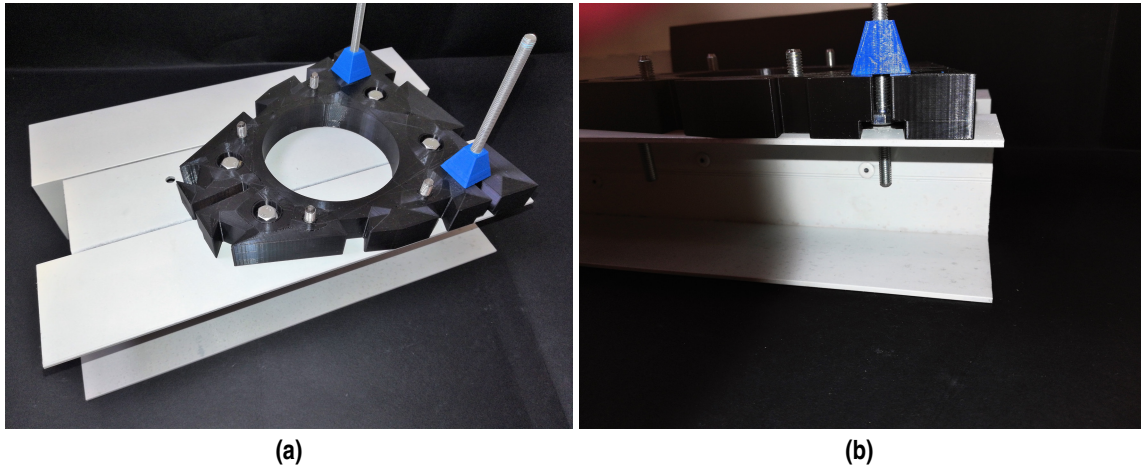
**Figura 4.18** Útil metálico de apoyo y fijación a la máquina CNC.

La base fija con almenas y acanaladuras que se ha diseñado se coloca sobre el útil metálico. Gracias a los taladros realizados podemos fijar con tornillos ambas partes y de esta forma la referencia no se pierde.



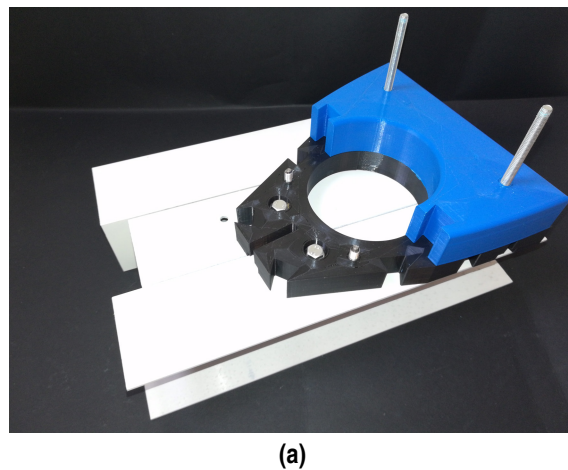
**Figura 4.19** Base fija sujeta con tornillos al útil metálico de apoyo.

Una vez la base está fijada, se colocan los tornillos en las acanaladuras y se roscan usando las piezas de apriete. Estos tornillos se ajustarán dentro de las acanaladuras para que coincidan con los orificios de la matriz que se vaya a usar en ese momento.

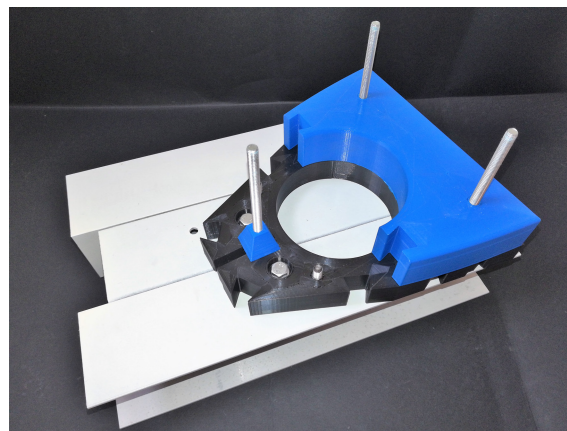


**Figura 4.20** (a) Colocación de los tornillos en las acanaladuras y piezas de apriete; (b) Detalle del tornillo y la acanaladura.

Se coloca la matriz a través de los tornillos hasta que coincida con las guías y asiente sobre la base fija y las piezas de apriete *Figura 4.19 (a)*.



(a)



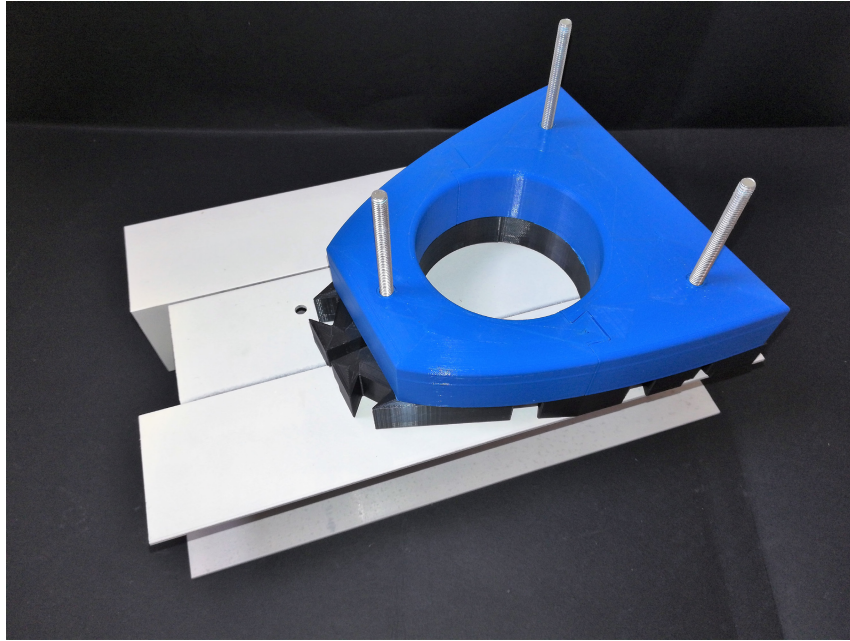
(b)

**Figura 4.21** (a) Matriz 2 colocada sobre la base fija; (b) Colocación del tornillo y pieza de apriete para la otra matriz .



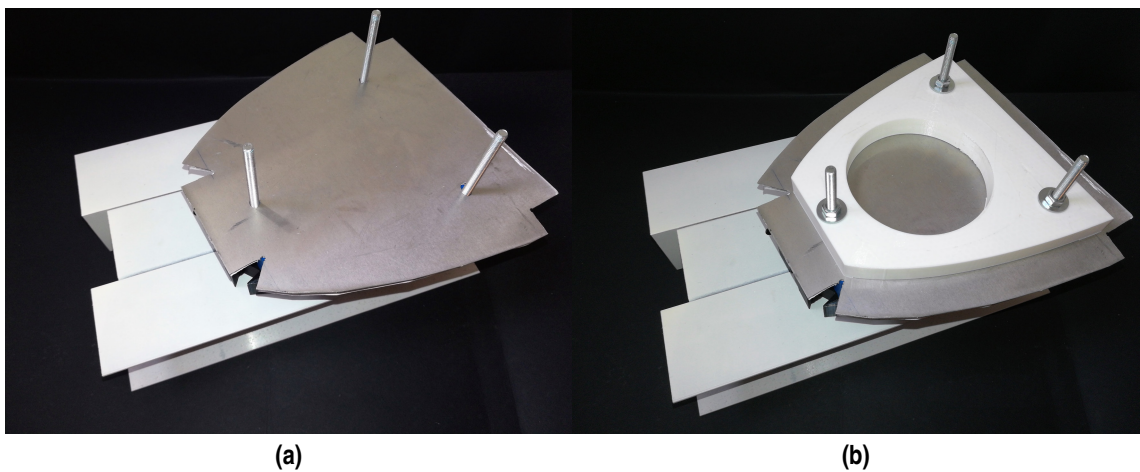
En la otra acanaladura se coloca el tornillo con su pieza de apriete *Figura 4.19 (b)*. De nuevo habrá que tener en cuenta la distancia de su colocación en función de la matriz que se vaya a usar.

Se introduce la matriz 4 a través de las almenas haciéndola coincidir con las guías de la base fija.



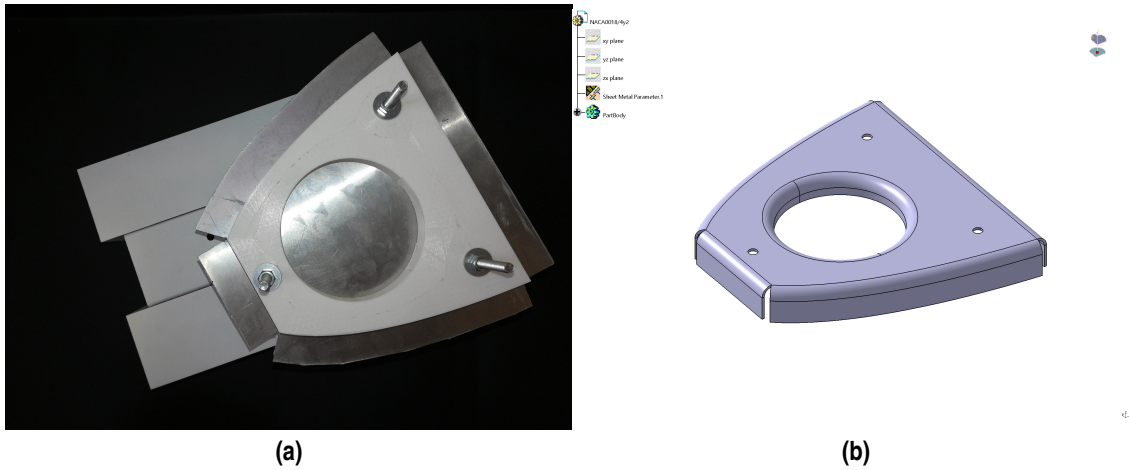
**Figura 4.22** Visualización de ambas matrices colocadas.

Una vez están montadas las matrices, se coloca la chapa precortada que se va a conformar pasando los tornillos a través de los TUs. El último paso sería colocar el prensachapa y apretar con tuercas todo el conjunto *Figura 4.21 (b)*.



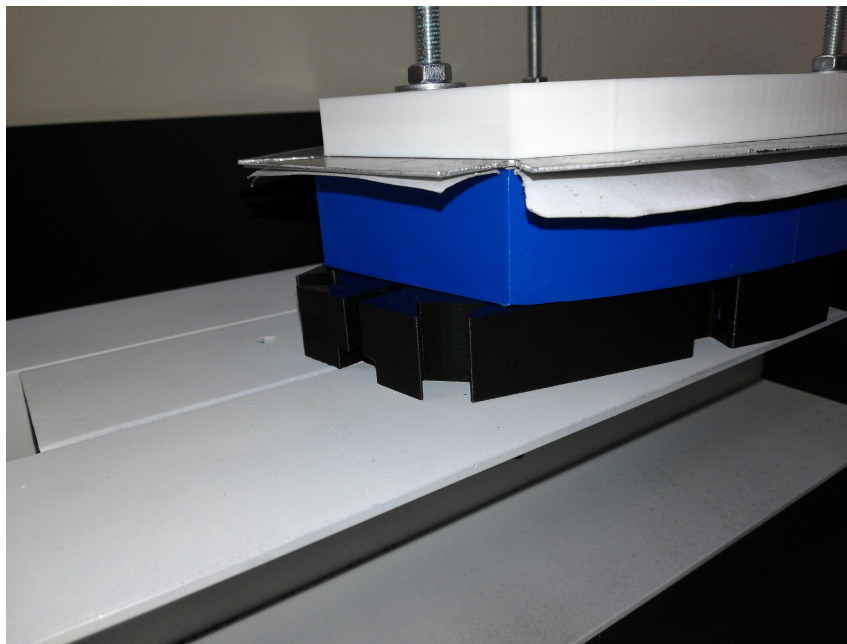
**Figura 4.23** (a) Colocación de la chapa a conformar; (b) Fijación del prensachapa.

Con el montaje de esta configuración se podría conformar la costilla que aparece en la *Figura 4.22 (b)*.



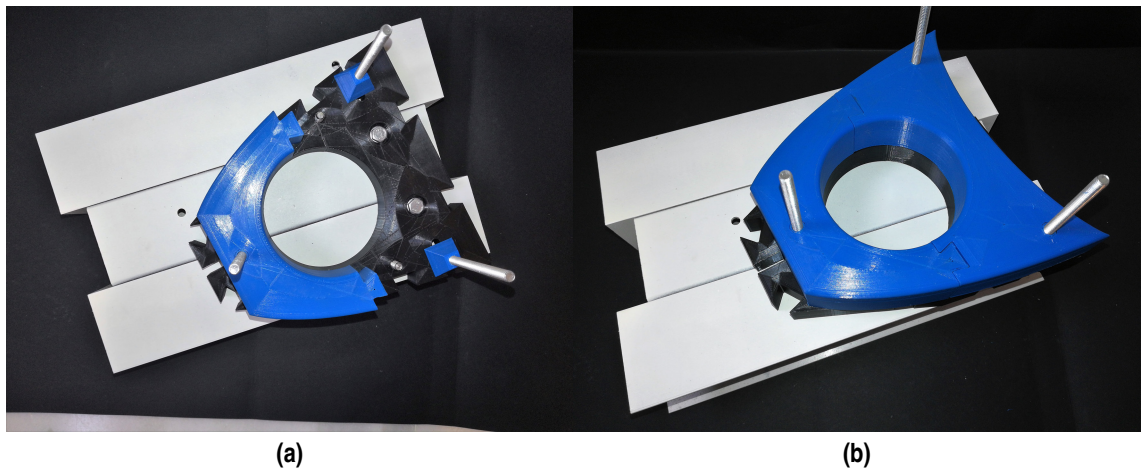
**Figura 4.24** Costilla conformada con las matrices 2 y 4.

En la siguiente figura se puede observar con más detalle como quedaría la chapa apilada para su conformación.



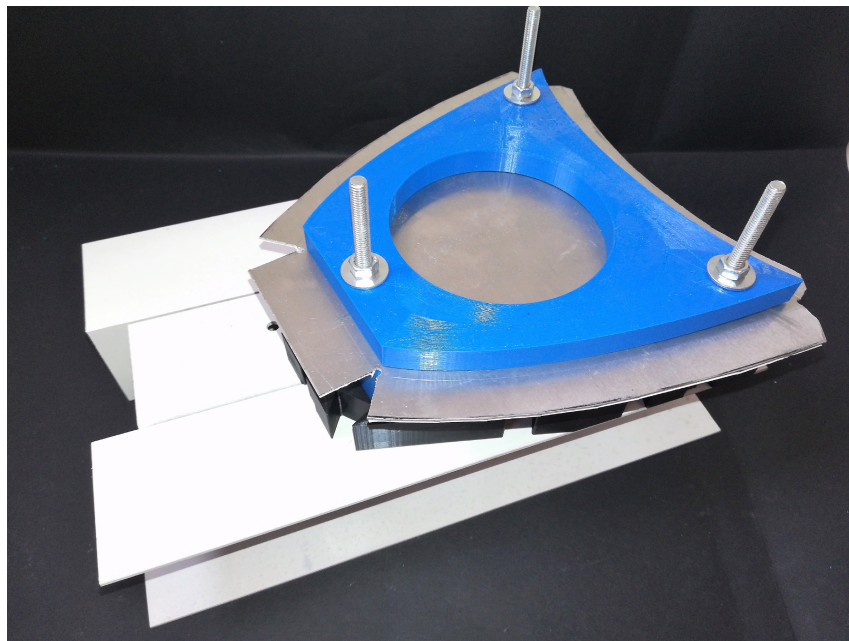
**Figura 4.25** Vista de perfil del montaje.

Para fabricar otra costilla solo hay que cambiar la configuración entre matrices, en este caso consiste en *sustituir la matriz 2 por la matriz 3*. Para ello se extrae la matriz 2 y se reajustan los tornillos para que coincidan con los orificios de la matriz 3. Se coloca la matriz 3 tal y como se hizo con la otra. *Figura 4.24*



**Figura 4.26** (a) Recolocación de los tornillos; (b) Colocación matriz 3 .

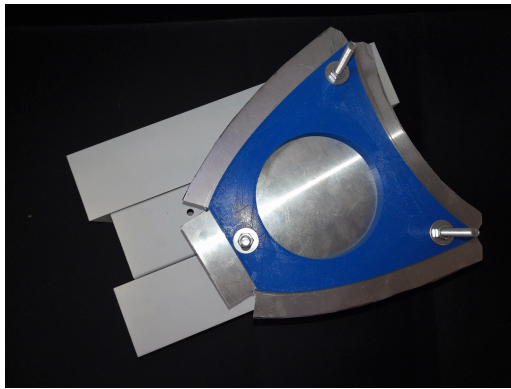
Se coloca la nueva chapa a conformar y el prensachapa que coincide con su perfil.



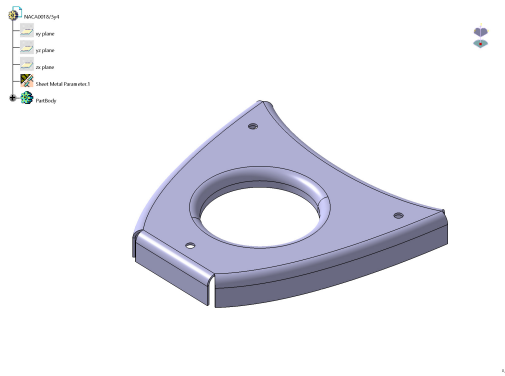
**Figura 4.27** Colocación de la nueva chapa a conformar y fijación con su prensachapa.



Con el montaje de esta configuración se podría conformar la costilla que aparece en la *Figura 4.26 (b)*.



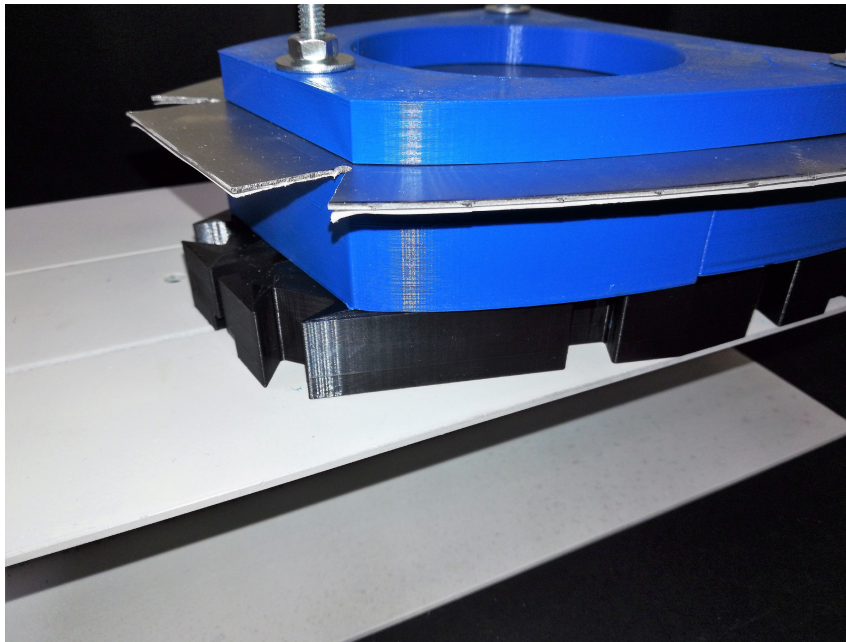
(a)



(b)

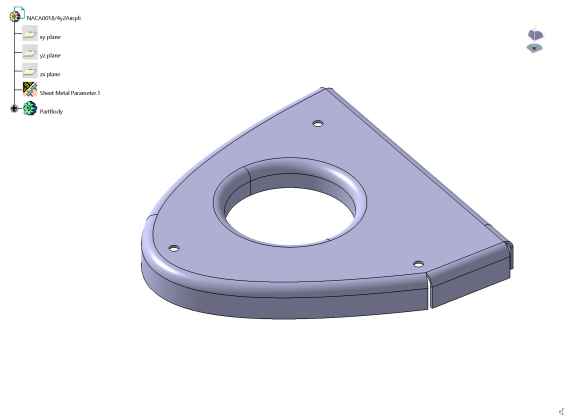
**Figura 4.28** Costilla conformada con las matrices 3 y 4.

En la siguiente figura se puede observar con más detalle como quedaría la chapa apilada para su conformación.



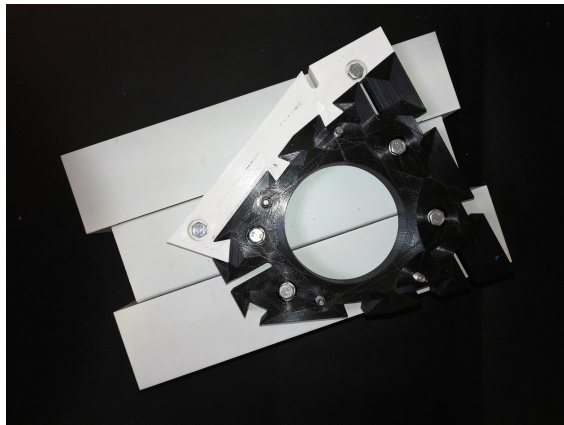
**Figura 4.29** Vista de perfil del segundo montaje.

Para conformar la siguiente costilla *Figura 4.28*, se le añadirá a la configuración constituida por la matriz 2 y 4 los útiles de ampliación que se diseñaron para tal efecto.

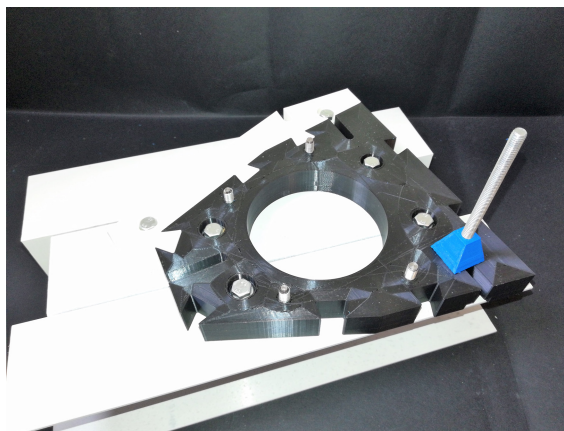


**Figura 4.30** Costilla conformada con la configuración ampliada.

La base fija se amplía con una base adicional que dará apoyo a la matriz de ampliación. La base de ampliación se encaja a través de las almenas a la base fija y se sujeta mediante tornillos al útil metálico.



(a)



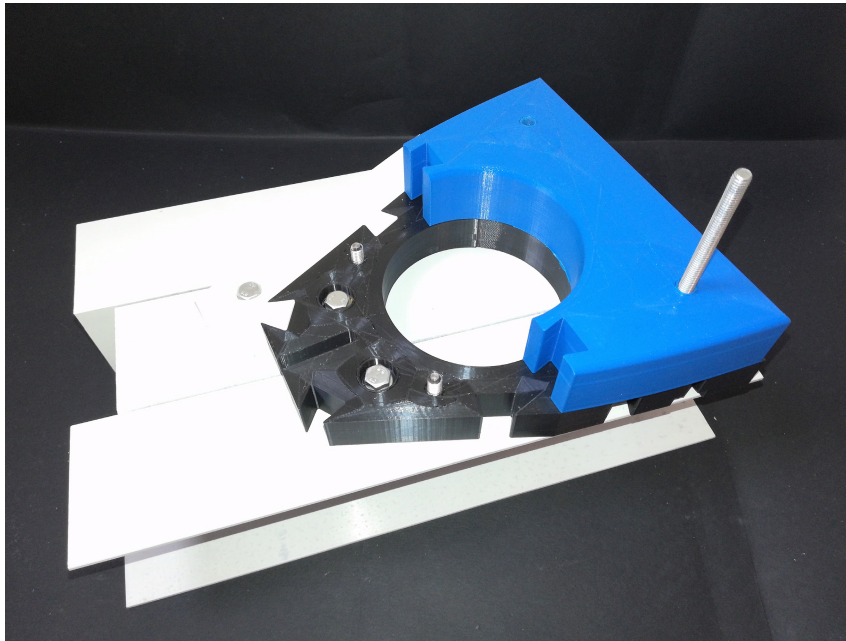
(b)

**Figura 4.31** (a) Base de ampliación encajada en la base fija y atornillada al útil metálico; (b) Colocación del tornillo en la acanaladura .



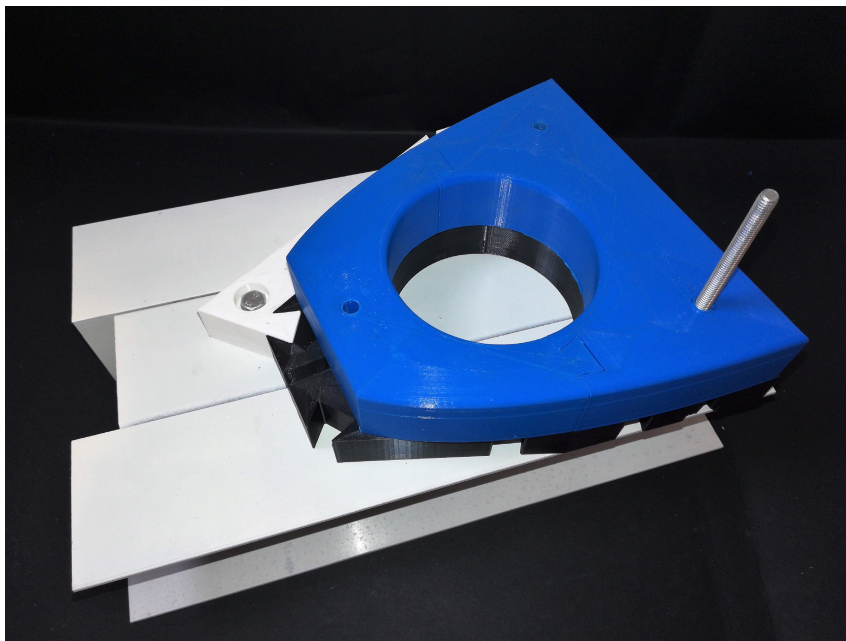
Esta costilla ampliada compartirá un TU en la misma posición que las anteriores, por eso se colocará el tornillo en la acanaladura. *Figura 4.29 (b)*

Se encaja y hace coincidir con las guías la matriz 2.



**Figura 4.32** Colocación matriz 2.

Se encaja la matriz 4, se puede observar como ésta solo estará centrada mediante las guías de la base fija y sujeta a la matriz 2 por medio de las almenas.



**Figura 4.33** Colocación matriz 4.

La matriz de ampliación irá sujeta por medio de un tornillo a la base fija y a la base de ampliación por medio de las acanaladuras que disponen.

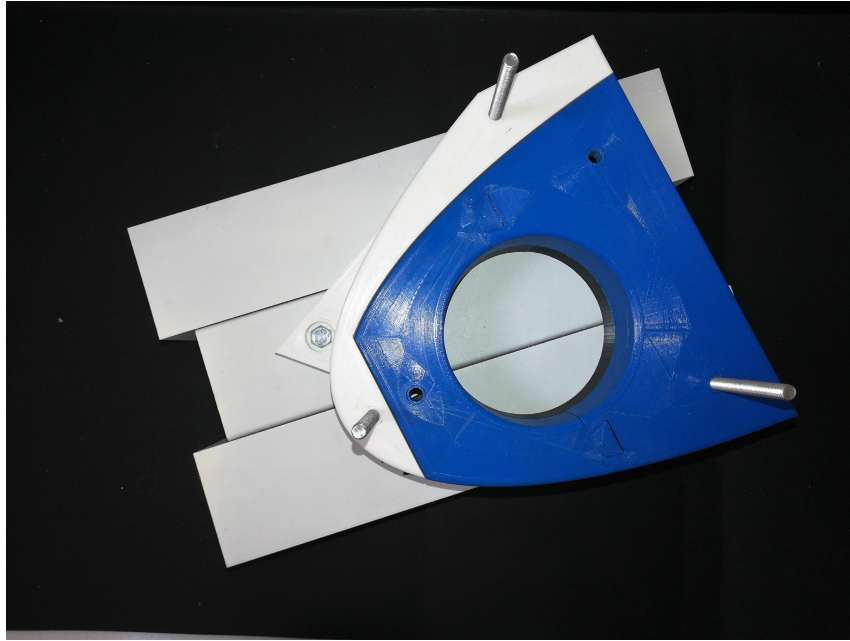


Figura 4.34 Colocación matriz de ampliación.

Para este caso no se ha llegado a diseñar el prensachapa necesario, cosa que quedará como mejora futura. Sin embargo una vez colocado el mismo, todo el conjunto quedaría fijado del mismo modo que en las configuraciones anteriores.

#### 4.4 Generación de las trayectorias para el conformado mediante SPIF

Una de las ventajas que tiene el conformado incremental es la obtención de las trayectorias del punzón de una forma sencilla, a través de un programa como por ejemplo DS Catia® v5.20. Una vez se construya el diseño mediante CAD, en este caso de la pirámide con ángulo variable, se procede a obtener el código de control numérico APT (mediante el módulo Machining del software).

Para generar las trayectorias y obtener el código para CNC se ha utilizado el *módulo de Machining en CATIA*. Si bien en el proceso de conformado por SPIF no hay arranque de viruta, este módulo sirve para nuestro cometido al ofrecernos los distintos puntos (x y z) que usaremos para conformar.

Para conformar los bordes de la chapa y darle el radio requerido se hace uso de la herramienta *ZLevel* dentro de *Surface Machining* y para la parte recta de la pestaña se hará mediante la orden *Profile Contouring* dentro de *Prismatic Machining*

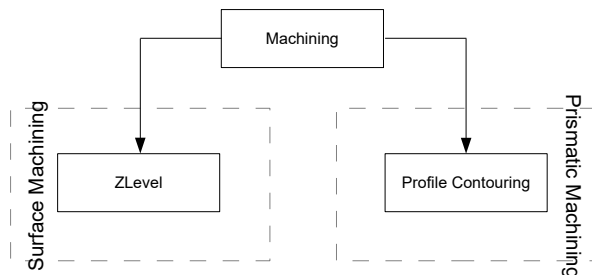
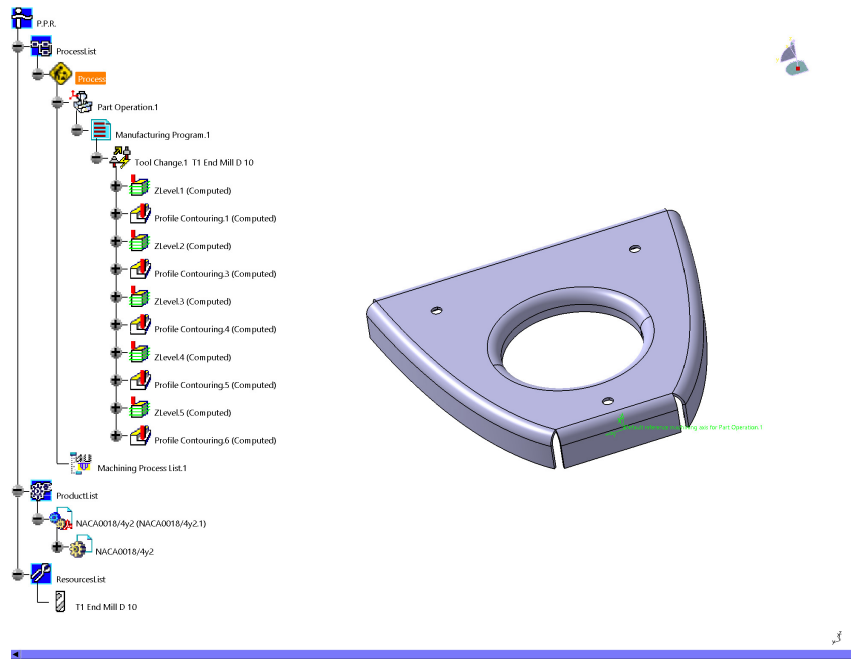


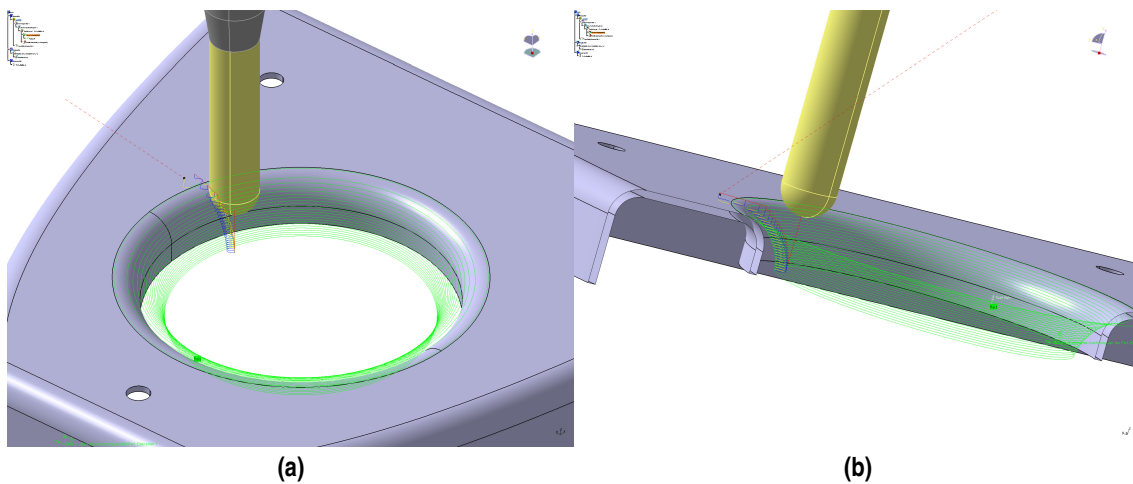
Figura 4.35 Ordenes usadas en CATIA.



**Figura 4.36** Visualización del CATProcess.

*La herramienta tendrá diámetro 12mm y la distancia entre niveles será de 0,2mm.*

En la siguiente figura se puede ver una visualización de las trayectorias obtenidas tras hacer un ZLevel en el hole-flanging.



**Figura 4.37** Visualización de las trayectorias generadas con ZLevel en el hole-flanging.



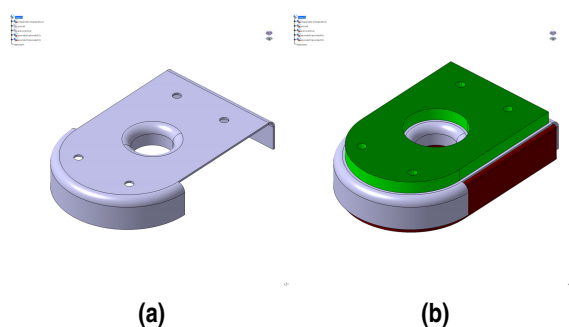
## 5 Viabilidad técnica del proyecto

---

Para probar la viabilidad técnica del proyecto se decidió realizar el rebordeado de un flanco semicircular en una chapa de aluminio 7075O de 1,2mm en una fresadora universal manual.

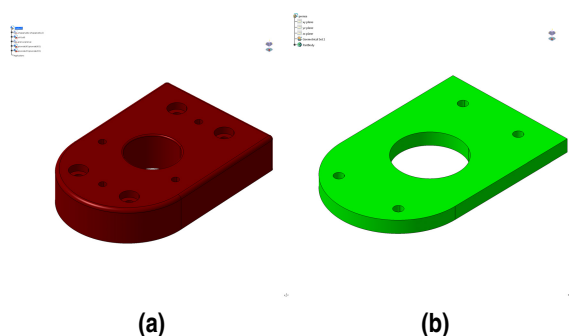
### 5.0.1 Diseño del elemental y utillaje de prueba

Se decidió fabricar un elemental de líneas semicirculares y rectas con el fin de evitar tener que programar trayectorias en CNC y que pudiera ser conformado con una máquina manual.



**Figura 5.1** (a) Diseño en CATIA del elemental experimental; (b) Conjunto montado.

La placa de respaldo al igual que el prensachapa se diseñaron en CATIA siguiendo la metodología y características desarrolladas en el concepto definitivo.



**Figura 5.2** (a) Placa de respaldo; (b) Prensachapa.

La placa de respaldo se fijará mediante cuatro tornillos al útil de apoyo diseñado para fijarse a la máquina de CNC, de forma similar al mostrado en la *Figura 4.16*. Además contará con el mismo sistema de apriete con el prensachapa que ya se ha comentado en capítulos anteriores.

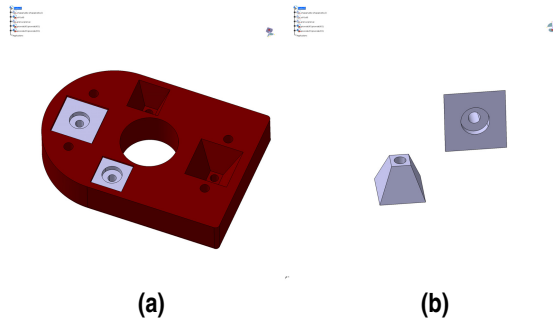


Figura 5.3 (a) Vista inferior de la placa de respaldo; (b) Apriete.

Se dotó a los distintos elementos de los gaps acordados previamente para este trabajo. Los prismas presentan un rebaje para evitar que, debido a la expansión del PLA, no encajaran en el hueco creado en la placa de respaldo.

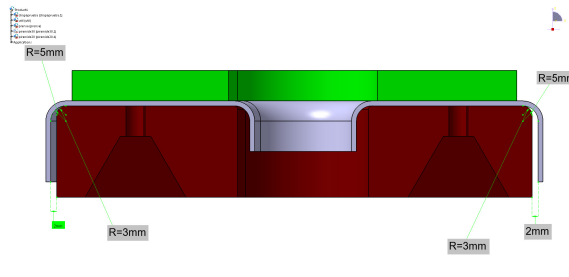


Figura 5.4 Vista de perfil de los gaps dados.

### 5.0.2 Impresión del utillaje de prueba

Puesto que para el prensachapa no se hizo un análisis previo, se decidió ajustar los parámetros extrapolando los resultados obtenidos para la matriz. Teniendo en cuenta el tamaño de los elementos de la malla MEF, se le dió una configuración de impresión con un grosor de *wall* y de *capa superior e inferior* igual que la *chapa* a conformar 1,2mm, además de un *relleno* del 20% con *patrón de rejilla* con el fin de hacer esta pieza lo más maciza posible.

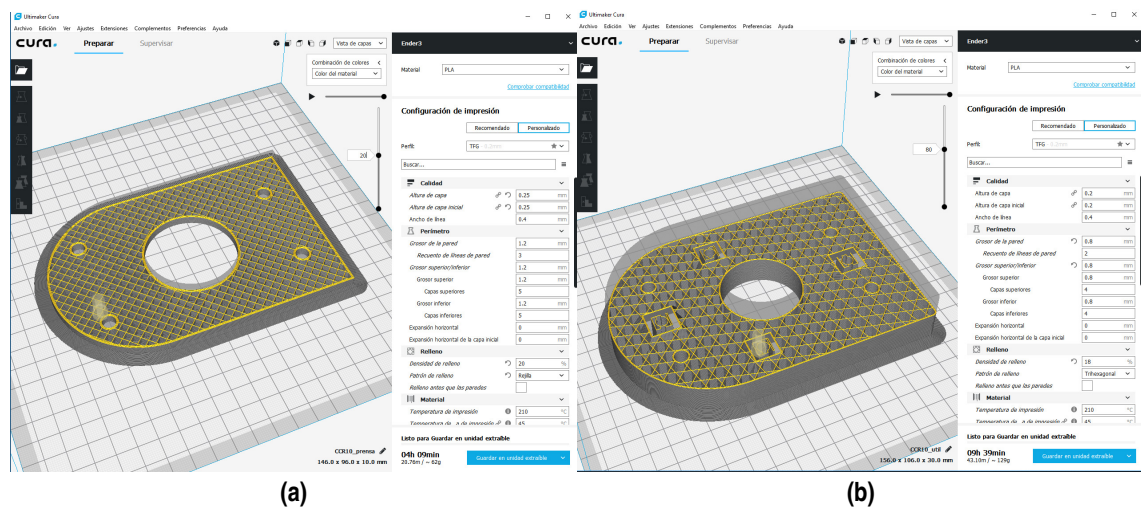
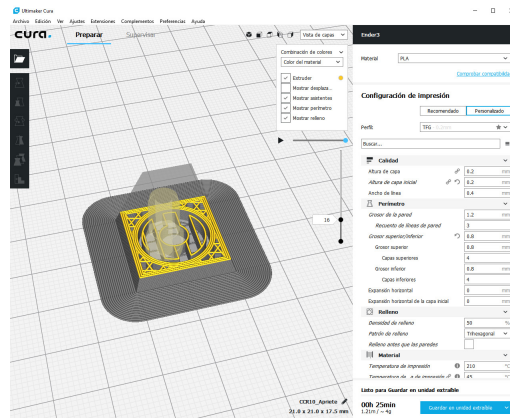


Figura 5.5 (a) Parámetros de impresión para el prensachapa experimental; (b) Parámetros de impresión para la matriz experimental.



Una vez se había impreso el prensachapa, siendo esta la primera pieza que se sacaría con la impresora adquirida para este TFG, se decidió *bajar la altura de capa de 0,25mm a 0,2mm* ya que es la altura de capa usada en Leacock et al., 2017, obteniéndose mejores resultados en calidad y por lo tanto estructuralmente, al soportar la pieza mejores esfuerzos a cortadura. Con la placa de respaldo y puesto que se buscaba ver en que rango de parámetros podíamos movernos a la hora de imprimir las futuras piezas, se decidió darle una configuración de impresión con un grosor de pared y de capa superior e inferior igual a 0,8mm, además de un relleno del 18% con patrón trihexagonal. Se eligió usar el patrón trihexagonal por se el más parecido a una estructura "honeycomb" que permite el software, además de presentar una disminución del tiempo de impresión frente al patrón de rejilla.

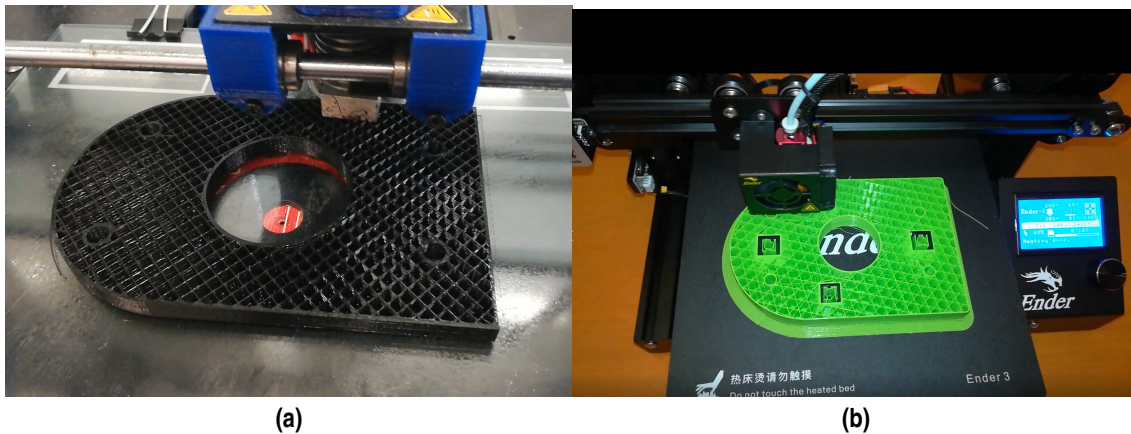
En cuanto al apriete los parámetros de impresión son similares a los establecidos para la matriz, simplemente se le dio un relleno del 50% para hacerlo lo más macizo posible, pues será una pieza que necesitará soportar cargas.



**Figura 5.6** Parámetros de impresión para el prisma de apriete.

Puesto que en este análisis no se buscaba optimizar tiempos de impresión, estos parámetros se dejaron tal y como el software CURA los ajusta por defecto.

A continuación se muestran algunas imágenes tomadas durante el proceso de impresión:

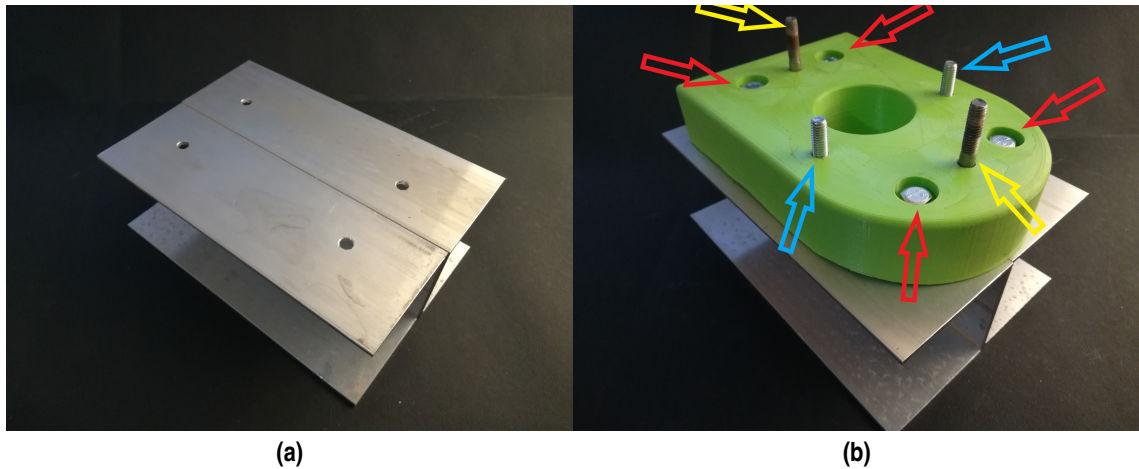


**Figura 5.7** (a) Prensachapa durante su proceso de impresión; (b) Placa de respaldo durante su proceso de impresión .

### 5.0.3 Conformado del elemental de prueba

El proceso de conformado mediante SPIF se hizo en una fresadora universal manual, ya que se buscaba comprobar que tanto la placa de respaldo como el prensachapa impresos por FDM permitirían realizar el proceso de conformado sin impedimentos y sin que se produjera el fallo o rotura de los mismos. Además poder realizarlo de forma manual evitaría tener que generar trayectorias y programar la máquina de CNC.

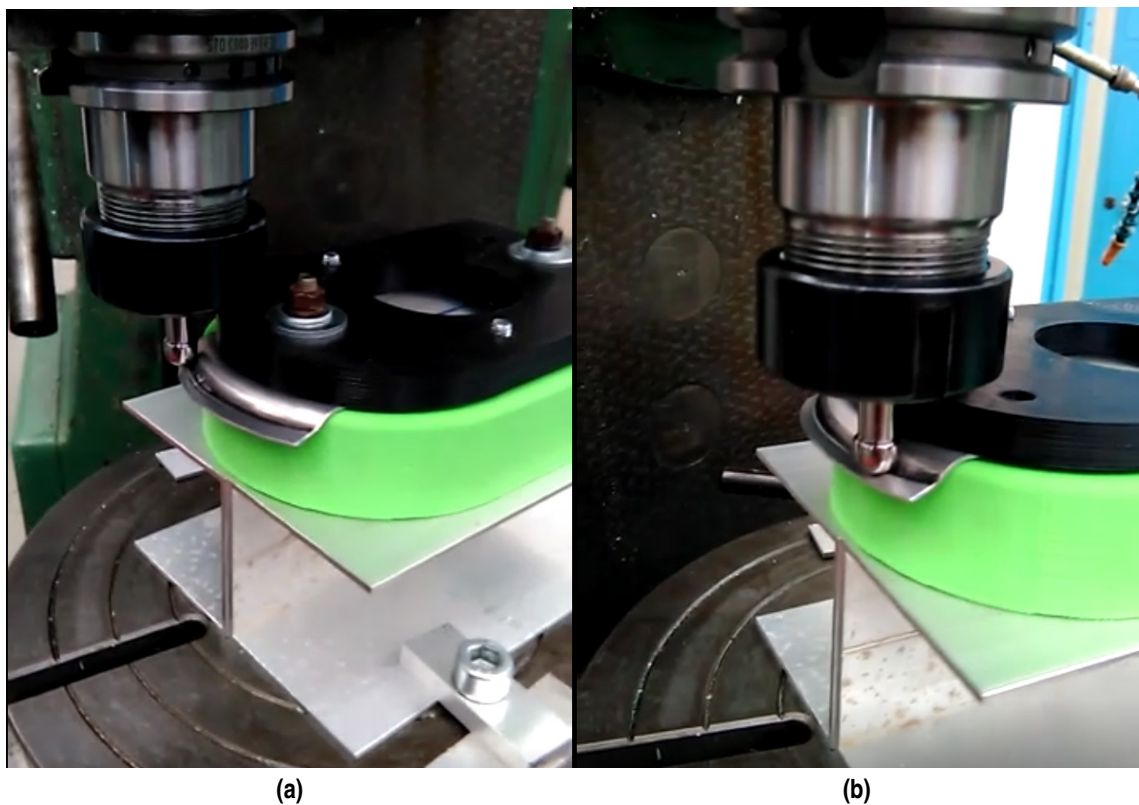
El montaje del conjunto de herramientas se realizó de forma similar a como se explicó en la *Sección 4.3 Capítulo 4*. Se fabricó un útil metálico para poder fijar las herramientas impresas a la máquina.



**Figura 5.8** (a) Útil metálico para la fijación a la máquina; (b) Placa de respaldo fijada en el útil metálico.

En la *Figura 5.8 (b)* se pueden observar los 4 taladros para fijar la placa de respaldo al útil metálico (flechas rojas) y también los tornillos para centrar el elemental con sus taladros de utillajes. Sin embargo la chapa elemental que se iba a conformar solo presentaba dos taladros que coincidirían con los que se observan en la figura con flechas amarillas.

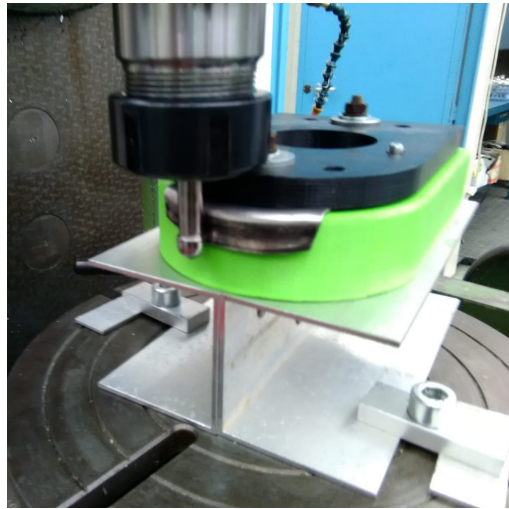
Como ya se ha dicho el proceso fue puramente manual y se realizó con pasadas de 0,5mm y una herramienta semiesférica de 12mm de diámetro.



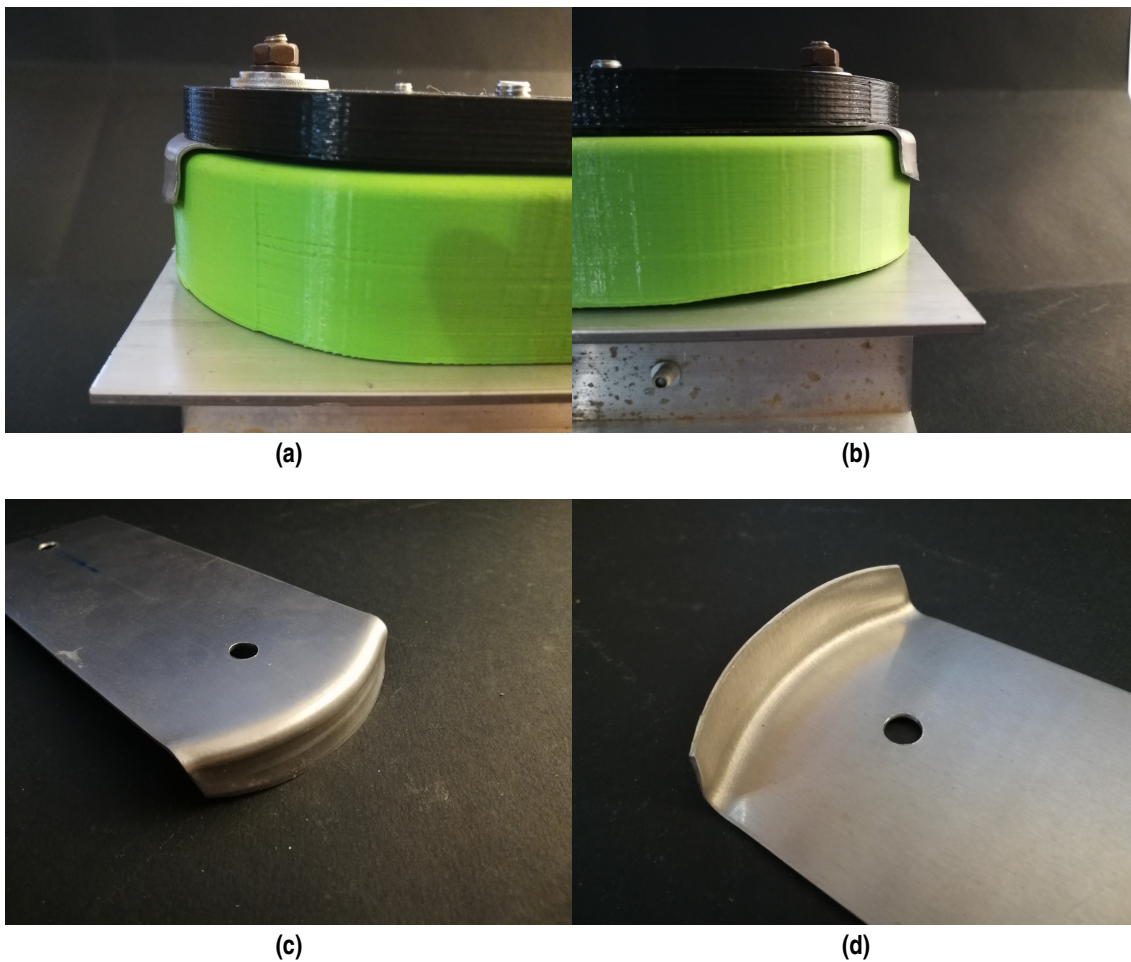
**Figura 5.9** Visualización del proceso de conformado por SPIF realizado.



En la *Figura 5.10* se puede observar que para asegurar que la chapa no sufra recuperación elástica la herramienta baja un poco más de la longitud del flanco fabricado.



**Figura 5.10** Finalización del proceso de conformado por SPIF.



**Figura 5.11** Vistas del elemental conformado.

En la *Figura 5.11 (a)* y *(b)* se puede observar como en el borde la chapa sufrió un ligero levantamiento. Por ello se decidió modificar el diseño del utillaje modular definitivo y hacer que el prensachapa muriera justo donde comienza el borde de la placa de respaldo y así conseguir un mayor apriete en esa zona. Observando la *Figura 5.11 (c)* se puede decir que el resultado es muy satisfactorio y la viabilidad del proyecto queda probada, además observando la *Figura (d)* podemos destacar la calidad de la chapa justo en su doblez, la cual no presenta marcas de la matriz debido a ser ésta más flexible que las habituales usadas.

## 6 Conclusiones y desarrollos futuros

---

En este proyecto se ha llevado a cabo el diseño y fabricación de un utillaje modular que permite la fabricación flexible de diferentes elementales aeronáuticas de chapa mediante un proceso de conformado incremental mono-punto. A fin de reducir los tiempos y los costes de fabricación del utillaje auxiliar necesarios en los procesos de SPIF, se ha llevado a cabo la fabricación de éste, mediante la técnica aditiva de modelado por deposición de fundido usando PLA.

Se ha diseñado un sistema de útiles modulares en el que se tiene una base fija, a la cual se ensamblan dichos útiles a través de uniones tipo almenadas. Este sistema modular permite introducir nuevas modificaciones en el diseño de las elementales a fabricar simplemente planteando la fabricación de matrices adicionales, con lo que se pueden desarrollar diseños de costillas cada vez más complejos, con un bajo coste de desarrollo en cuanto a herramientas se refiere.

El concepto modular permite fabricar costillas de gran tamaño sin la necesidad de disponer de impresoras con un gran volumen de impresión.

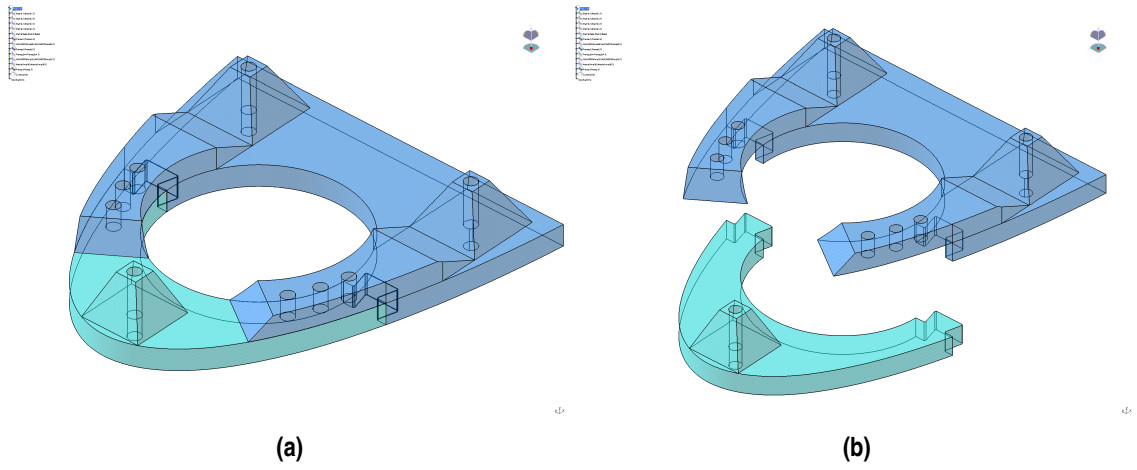
La metodología desarrollada en CATIA permite un prototipado rápido de los útiles y una rápida implementación en FDM.

Se puede observar como el tiempo de diseño y fabricación de una matriz, para introducir modificaciones en el conjunto de utillajes modulares y fabricar nuevas costillas, oscila en un periodo de entre 6 y 8 horas. Se puede decir, en base a las pruebas realizadas por las que se consiguieron una reducción del tiempo de impresión en una pieza del 15% aproximadamente, que existe la posibilidad de conseguir mejores tiempos de impresión optimizando estos parámetros.

El consumo de material para todos los útiles de este trabajo se encuentra en torno a 1kg de PLA, esto nos da un coste en torno a 25€. Si asumimos unos costes recurrentes del 20% por pieza, obtenemos un coste total de unos 70€. Se puede decir que la integración de FDM a un proceso de SPIF abarata los costes de este proceso.

Finalmente se ha puesto de manifiesto la viabilidad técnica del proyecto mediante la fabricación de una elemental conformada en una fresadora universal manual. Se ha podido observar como el uso de placas de respaldo fabricadas por FDM en un proceso de conformado incremental no genera marcas en las zonas donde la pieza elemental se encuentra en contacto con la misma. En los trabajos futuros está previsto seguir desarrollando este proyecto para su implementación dentro un centro de mecanizado CNC que permita la fabricación de costillas aeronáuticas con diferentes rasgos: hole-flanging, rebordeado de flancos cóncavos y convexos, etc.

Se tiene previsto la automatización en CATIA por medio de macros, de la obtención de los útiles a partir de una costilla dada. Así como seguir desarrollando y ampliando el concepto de modularidad, diseñando prensachapas con uniones almenadas.



**Figura 6.1** Diseño futuro de prensachapa modular.

# Índice de Figuras

1.1	Matriz mecanizada para hidroconformar y arrugas presentes en la pieza hidroconformada	1
1.2	(a) Matriz con prensa chapa; (b) Pieza hidroconformada y material de desecho	2
1.3	(a) Representación de un proceso SPIF; (b) Montaje para el conformado por SPIF	3
1.4	Representación esquemática del FDM (Ahn et al., 2009)	3
1.5	Plantilla de polímero para taladrado previo (Labuz, 2017)	4
1.6	(a) Matrices de policarbonato superior e inferior; (b) Montaje en prensa hidráulica; (c) Matriz inferior; (d) Pieza estampada (Durgun, 2015)	4
1.7	(a) Superficie superior de la pieza conformada; (b) Superficie de la pieza en contacto con el útil (Leacock et al., 2017)	5
1.8	(a) Piezas ensambladas; (b) Superficie superior de la pieza; (c) Superficie inferior de la pieza (Leacock et al., 2017)	5
2.1	Perfil esquemático de una estructura alar	7
2.2	(a) y (b) ejemplos reales de "nose rib"; (c)(d)(e)(f) costillas realizadas en CATIA	8
2.3	Versión 1 utillaje modular: (a) Vista expandida del conjunto; (b) Ensamblaje para ampliar la placa de respaldo (backing plate) original	8
2.4	Versión 2 utillaje modular: (a) Conjunto ensamblado con costilla sin conformar; (b) Conjunto ensamblado con costilla conformada	9
2.5	Versión 2 utillaje modular: Conjunto ensamblado con útil de ampliación	9
2.6	Versión 2 utillaje modular: (a) Placa de respaldo; (b) Útil de ampliación para la placa de respaldo	10
2.7	Versión 2.1 utillaje modular: Conjunto ensamblado con útil de ampliación	10
2.8	Versión 2.1 utillaje modular: Costillas obtenidas según las distintas configuraciones	10
2.9	Versión 3 utillaje modular: (a) Vista expandida del conjunto; (b) Ensamblaje del útil de ampliación	11
2.10	Versión 3 utillaje modular: (a) Placa de respaldo; (b) Útil de ampliación para la placa de respaldo	11
2.11	Versión 4 utillaje modular: (a) Vista de una de las configuraciones del conjunto; (b) Vista expandida ensamblaje vertical	12
2.12	Versión 4 utillaje modular: (a) Concepto de fijación desechado; (b) Base de apoyo fija a la máquina de CNC	12
2.13	Versión 4 utillaje modular: Visualización de las almenas en los útiles	13
2.14	Versión 4 utillaje modular: (a) Ejemplo de costilla obtenida al variar la configuración de útiles; (b) Orificios para fijar el prensachapa	13
2.15	Versión 5 utillaje modular definitivo: Base fija	14
2.16	Versión 5 utillaje modular definitivo: (a) Vista inferior de una de las placas de respaldo; (b) Encaje de la pieza de apriete	14
2.17	Versión 5 utillaje modular definitivo: Vista de uno de los montajes posibles	15
2.18	Versión 5 utillaje modular definitivo: Ejemplo de las distintas piezas diseñadas para configurar placas de respaldo	15
2.19	Versión 5 utillaje modular definitivo: (a) Conjunto ensamblado con costilla sin conformar; (b) Conjunto ensamblado con costilla conformada	15
2.20	Versión 5 utillaje modular definitivo: Ejemplo de las distintas piezas diseñadas para configurar placas de respaldo	16

2.21	Versión 5 utillaje modular definitivo: Vistas del conjunto ampliado y costilla que se obtendría con la configuración	16
2.22	Versión 5 utillaje modular definitivo: Zoom sobre acople entre almenas	17
2.23	Etapa 2 Placa de respaldo: (a) Selección superficie de contacto inferior del elemental; (b) Sketch con Project 3D Elements	18
2.24	Etapa 3 Placa de respaldo: (a) Pad a partir del Sketch del paso previo; (b) Visualización del Pad realizado	18
2.25	Etapa 4 Placa de respaldo: aumento de espesor mediante Thickness Definition	19
2.26	Etapa 5 Placa de respaldo: (a) Rebordeado con Edge Fillet; (b) Visualización placa de respaldo tras etapa 5	19
2.27	Etapa 1 Prensachapa: Inserción CATPart	20
2.28	Etapa 2 Prensachapa: (a) Selección superficie de contacto superior del elemental; (b) Sketch con Project 3D Elements	20
2.29	Etapa 3 Prensachapa: (a) Pad a partir del Sketch del paso previo; (b) Visualización del Pad realizado	21
2.30	(a) Visualización del corte por el plano ZX; (b) Vista sección plano ZX	21
2.31	Detalles de los gaps y radios obtenidos	22
2.32	Flujo de la metodología	22
3.1	(a) Versión 4 del útil empleada en el análisis; (b) Montaje analizado	23
3.2	(a) Visualización del mallado; (b) Resultado de las tensiones obtenidas	24
3.3	Visualización tensiones obtenidas desde una vista inferior	25
3.4	Zoom sobre la zona del contacto entre herramienta, chapa y placa de respaldo	25
3.5	Resultados obtenidos en el backing plate	26
4.1	(a) Impresora utilizada para el TFG (b) Software Ultimaker Cura 3.3.1	27
4.2	Almenas de prueba impresas con 0mm, 0,2mm y 0,25mm de rebaje respectivamente	28
4.3	(a) Encaje almenas 0,2mm de gap. (b) Encaje almenas 0,25mm de gap	28
4.4	Pieza de apriete	30
4.5	Procesado de placas de respaldo con Ultimaker Cura 3.1.1: (a) Matriz 1; (b) Matriz 2; (c) Matriz 4; (c) Matriz 3	30
4.6	(a) Base fija; (b) Prensachapa; (c) Útil de ampliación; (d) Base fija de ampliación	31
4.7	(a) Duración del proceso de impresión a 150 % de velocidad; (b) Visualización encaje y calidad de las piezas	32
4.8	(a) Problemas surgidos con el aumento de velocidad; (b) Prensachapa sin primera capa rellena	33
4.9	(a) Impresión del borde y primera capa de soportes; (b) Proceso de impresión capa 1	33
4.10	Proceso de impresión capa 4	34
4.11	Proceso de impresión capa 5	34
4.12	(a) Proceso de impresión capa 8; (b) Proceso de impresión capa 12	35
4.13	Proceso de impresión capa 51	35
4.14	(a) Proceso de impresión capa 55; (b) Proceso de impresión capa 56	36
4.15	(a) Proceso de impresión capa 102; (b) Proceso de impresión capa 105	36
4.16	(a) Proceso de impresión capa 146; (b) Proceso de impresión capa 147	37
4.17	Pieza acabada	37
4.18	Útil metálico de apoyo y fijación a la máquina CNC	38
4.19	Base fija sujeta con tornillos al útil metálico de apoyo	38
4.20	(a) Colocación de los tornillos en las acanaladuras y piezas de apriete; (b) Detalle del tornillo y la acanaladura	39
4.21	(a) Matriz 2 colocada sobre la base fija; (b) Colocación del tornillo y pieza de apriete para la otra matriz	39
4.22	Visualización de ambas matrices colocadas	40
4.23	(a) Colocación de la chapa a conformar; (b) Fijación del prensachapa	40
4.24	Costilla conformada con las matrices 2 y 4	41
4.25	Vista de perfil del montaje	41
4.26	(a) Recolocación de los tornillos; (b) Colocación matriz 3	42
4.27	Colocación de la nueva chapa a conformar y fijación con su prensachapa	42
4.28	Costilla conformada con las matrices 3 y 4	43
4.29	Vista de perfil del segundo montaje	43

4.30	Costilla conformada con la configuración ampliada	44
4.31	(a) Base de ampliación encajada en la base fija y atornillada al útil metálico; (b) Colocación del tornillo en la acanaladura	44
4.32	Colocación matriz 2	45
4.33	Colocación matriz 4	45
4.34	Colocación matriz de ampliación	46
4.35	Ordenes usadas en CATIA	46
4.36	Visualización del CATProcess	47
4.37	Visualización de las trayectorias generadas con ZLevel en el hole-flanging	47
5.1	(a) Diseño en CATIA del elemental experimental; (b) Conjunto montado	49
5.2	(a) Placa de respaldo; (b) Prensachapa	49
5.3	(a) Vista inferior de la placa de respaldo; (b) Apriete	50
5.4	Vista de perfil de los gaps dados	50
5.5	(a) Parámetros de impresión para el prensachapa experimental; (b) Parámetros de impresión para la matriz experimental	50
5.6	Parámetros de impresión para el prisma de apriete	51
5.7	(a) Prensachapa durante su proceso de impresión; (b) Placa de respaldo durante su proceso de impresión	51
5.8	(a) Útil metálico para la fijación a la máquina; (b) Placa de respaldo fijada en el útil metálico	52
5.9	Visualización del proceso de conformado por SPIF realizado	52
5.10	Finalización del proceso de conformado por SPIF	53
5.11	Vistas del elemental conformado	53
6.1	Diseño futuro de prensachapa modular	56





# Índice de Tablas

---

3.1	Propiedades mecánicas Nylon	24
3.2	Propiedades mecánicas Al 7075O	24
3.3	Propiedades mecánicas Acero	24
4.1	Parámetros de impresión comunes para todas las piezas	29
4.2	Parámetros de impresión para el perímetro de la pieza	30
4.3	Tiempos de fabricación y consumo de material	32



# Bibliografía

---

- AHN, Daekeon; KWEON, Jin-Hwe; KWON, Soonman; SONG, Jungil y LEE, Seokhee, 2009. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209, n.º 15-16, págs. 5593-5600.
- BORREGO, M.; MORALES-PALMA, D.; MARTÍNEZ-DONAIRE, A. J.; CENTENO, G. y VALLELLANO, C., 2016. Experimental study of hole-flanging by single-stage incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technologies*. Vol. 237, págs. 320-330.
- CENTENO, G.; SILVA, M. B.; CRISTINO, V. A. M.; VALLELLANO, C. y MARTINS, P. A. F., 2012. Hole-flanging by incremental sheet forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 59, págs. 46-54.
- CENTENO, Gabriel; BAGUDANCH, Isabel; MARTÍNEZ-DONAIRE, A. J.; GARCÍA-ROMEY, M. L. y VALLELLANO, C., 2014. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming. *Materials & Design*. Vol. 63, págs. 20-29.
- CENTENO, Gabriel; MARTÍNEZ-DONAIRE, Andrés; BAGUDANCH, Isabel; MORALES-PALMA, Domingo; GARCÍA-ROMEY, María y VALLELLANO, Carpóforo, 2017. Revisiting formability and failure of AISI304 sheets in SPIF: Experimental approach and numerical validation. *Metals*. Vol. 7, n.º 12, págs. 531.
- DURGUN, Ismail, 2015. Sheet Metal Forming Using FDM Rapid Prototype Tool. *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 21, n.º 4, págs. 412-422.
- FARAH, Shady; ANDERSON, Daniel G. y LANGER, Robert, 2016. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. Vol. 107, págs. 367-392.
- LABUZ, Salomón Benasuly, 2017. Curso de Utilaje de Montaje. En: *Curso de Utilaje de Montaje*. Sevilla.
- LEACOCK, Alan; VOLK, Gregor; MCCracken, David y BROWN, Desmond, 2017. The use of Fused Deposition Modelled Tooling in Low Volume Production of Stretch Formed Double Curvature Components. *Procedia Engineering*. Vol. 183, págs. 343-350.
- MARTÍNEZ-DONAIRE, A. J.; MORALES-PALMA, D.; CABALLERO, A.; BORREGO, M.; CENTENO, G. y VALLELLANO, C., 2017. Numerical explicit analysis of hole flanging by single-stage incremental forming. *Procedia Manufacturing*. Vol. 13, págs. 132-138.
- MORALES-PALMA, D.; BORREGO, M.; MARTÍNEZ-DONAIRE, A. J.; CENTENO, G. y VALLELLANO, C., 2017. Preliminary investigation on homogenization of the thickness distribution in hole-flanging by SPIF. *Procedia Manufacturing*. Vol. 13, págs. 124-131.
- TORRES, Jonathan; COTELO, José; KARL, Justin y GORDON, Ali P., 2015. Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives. *JOM*. Vol. 67, n.º 5, págs. 1183-1193.